

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'étude
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie
Mécanique

Thème

Avant-projet de chauffe-eau solaire pour un
immeuble urbain en climat littoral

Proposé et dirigé par :
Pr. M^r. AIT ALI

présenté par :
ABDELHAFIDI Noureddine

Promotion: 2012

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

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donnée la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Je remercie aussi ma famille, à qui revient la gloire de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon promoteur M^r AIT ALI et d'avoir accepté de diriger cette étude.

Je remercie également les membres du jury, qui ont accepté de discuter et d'examiner ce modeste travail.

J'adresse aussi ma profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

A mon père et ma mère;

A mes frères ;

A toute la famille;

A mon promoteur M^r AIT ALI;

A tous mes amis;

Et tout qui j'ai connus durant ma formation

Je dédie ce travail.

هذا البحث يهدف الى تحديد الابعاد و الخصائص الرئيسية لتسخين الشمسي للماء وهذا من اجل مبنى جماعي يحتوي 16 شقة موزعة على 4 طوابق حيث تضم كل شقة 6 أفراد، هذا العمل يحقق دراسة أداء اللاقط الشمسي المسطح في ظروف مناخ الهضاب العليا الجزائرية وهذا باستعمال طريقة للحصول على السعات اللازمة لإنتاج الماء الساخن، وجرى تقييم هذا من اجل سعة 4000 لتر في اليوم مغطاة بنسبة 56% والباقي سيتم توفيره عن طريق مسخن الغاز أو الكهرباء.

كلمات مفتاحية: التسخين الشمسي للماء، اللاقط الشمسي، انتاج الماء الساخن.

Résumé

L'objectif entrepris dans ce projet de fins d'études consiste à déterminer les dimensions et caractéristiques principales d'un chauffage d'eau sanitaire pour un immeuble collectif de 16 appartements distribués sur quatre étages et pour une population de 6 personnes par appartement; le travail réalisé est une étude des performances des capteurs solaires plans dans les conditions climatiques des haut plateaux d'Algérie et l'utilisation de la méthode de f-Chart pour obtenir les capacités nécessaires de production d'eau chaude ; celles-ci ont été évaluées à 4 000 litres par jour et couvertes a 56%; le complément sera assuré par un chauffage au gaz ou électricité.

Mots clés : chauffage d'eau sanitaire, capteur solaire plan, production d'eau chaude .

Abstract

The objective of this project is to determine the main dimensions and characteristics of solar water heater system for a building of four floors each with four apartments for six persons each. The work integrates the study of flat collector performances within the climate conditions of the Algerian high lands using the f-Chart method to obtain the required amounts of hot water. These have been estimated at 4 000 liters per day, covered at 56%; the remaining complement will be obtained with gas or electricity heaters.

Keywords: solar water heater system, flat collector, hot water.

NOMENCLATURE

NOTATIONS LATINES

| | |
|----------|---|
| A_c | surface de captation (m^2) |
| C_r | constante de refroidissement. |
| D | diamètre (mm) |
| G_h | rayonnement solaire horizontal. |
| G_0 | rayonnement solaire extraterrestre |
| G_{sc} | constante solaire (W/m^2) |
| G_{bh} | rayonnement direct horizontal. |
| G_{dh} | rayonnement diffus horizontal. |
| G_b | rayonnement direct reçu sur un plan incliné |
| G_d | rayonnement diffus reçu sur un plan incliné |
| G_r | rayonnements réfléchis. |
| G | rayonnement globale reçu sur un plan incliné. |
| h | coefficient de convection. |
| K_t | indice de clarté. |
| q_a | flux absorbé |
| q_u | flux utile |
| q_p | flux stocker |
| S | surface. |
| t | temps. |
| T_{pm} | température moyenne de la paroi absorbante. |
| T_a | température ambiante. |
| T_s | température de stockage |
| T_f | température d'eau froide |
| T_c | température d'eau chaude |
| T_p | température à l'entrée du capteur |

| | |
|-----------|--|
| T_{ref} | température de référence |
| N | nombre de jour. |
| k | coefficient de conductivité. |
| U_m | coefficient de perte globale. |
| U | coefficient de perte thermique du ballon de stockage |
| R_b | constante d'inclinaison |
| V | volume de stockage |

CARACTERES GRECS

| | |
|------------|--|
| α | coefficient d'absorption |
| β | angle inclinaison du capteur |
| δ | déclinaison solaire |
| ω | l'angle horaire |
| ω_s | l'angle horaire de soleil au couché |
| τ | coefficient de transmission |
| η | rendement global |
| η_0 | rendement optique |
| η_i | rendement interne |
| σ | constante de Stefan-Boltzman |
| ρ | coefficient de réflexion (albédo du sol) |
| φ | latitude |
| γ | azimut |
| μ | viscosité cinématique |
| θ | l'angle incidente sur une surface incliné |
| θ_z | angle incidente sur une surface horizontal |

Table de Matière

| | |
|--|----|
| CHAPITRE I : GENERALITES | 14 |
| CHAPITRE I: GENERALITES | 15 |
| Énergie solaire: | 15 |
| UTILISATION L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE..... | 19 |
| Production d'eau chaude sanitaire | 19 |
| L'architecture de solaire passive :..... | 22 |
| CHAPITRE II: CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE..... | 27 |
| CHAPITRE II: CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE..... | 28 |
| Principe :..... | 28 |
| Types de capteurs solaires :..... | 28 |
| Capteur plan sans vitrage :..... | 29 |
| Capteur plan avec vitrage :..... | 30 |
| Capteur à tube sous vide : | 30 |
| Les différents composants d'un capteur solaire plan vitré : | 31 |
| L'absorbeur :..... | 31 |
| Le fluide caloporteur :..... | 32 |
| La couverture transparente :..... | 33 |
| L'isolation thermique :..... | 33 |
| Coffre :..... | 34 |
| Classification des capteurs : | 35 |
| L'orientation des capteurs : | 35 |
| Les types des composants :..... | 36 |
| La couverture | 36 |
| L'absorbeur | 36 |
| Fonctionnement d'un capteur solaire plan..... | 36 |
| Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires : | 37 |
| Bilan thermique du capteur plan vitre | 38 |
| Rendements d'un capteur solaire..... | 39 |
| Paramètres de fonctionnement du capteur solaire: | 39 |
| Paramètres de performance des capteurs solaires : | 39 |
| Les différents modes de transferts thermiques | 43 |
| La conduction..... | 43 |
| La convection :..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Le rayonnement : | 44 |
| Pertes thermiques du capteur : | 44 |
| Pertes à l'avant du capteur : | 46 |
| Pertes à l'arrière du capteur : | 48 |
| Pertes par les faces latérales du capteur : | 48 |
| CHAPITRE III : MODELISATION | 51 |
| Introduction: | 51 |
| Principe de fonctionnement : | 51 |
| Système solaire : | 51 |
| Système solaire de captage : | 52 |
| Installation des Capteurs solaires : | 52 |
| Protection contre le gel : | 52 |
| Estimation du rayonnement solaire : | 52 |
| Système de stockage : | 57 |
| Dimensionnement du stockage : | 58 |
| Pertes thermiques de stockage : | 58 |
| Système de distribution : | 59 |
| Circuit primaire (solaire) : | 59 |
| Dimensionnement des composants du circuit : | 67 |
| Perte de charge | 70 |
| CHAPITRE IV: DETAIL DE CALCUL ET ANALYSE DES RESULTATS | 72 |
| Introduction: | 72 |
| Calcul des rayonnements solaires global G : | 73 |
| Rayonnement direct et rayonnement diffus sur un plan horizontal : | 73 |
| Consommation d'eau chaude..... | 74 |
| Estimation de la température d'eau froide « T_f »: | 75 |
| Calcul des pertes mensuelles de transmission entre le ballon solaire et l'appoint : | 76 |
| Calcul des pertes de distribution mensuelles : | 76 |
| Ballon de stockage : | 77 |
| Calcul des pertes mensuelles de stockage solaire : Le calcul des pertes mensuelles de la partie solaire du stockage solaire s'effectue de la façon suivante : | 77 |
| Calcul final des besoins mensuels totaux : | 77 |
| Surface de champ des Capteurs solaire : | 77 |
| Choix d'un type de capteur : | 77 |

| | |
|--|----|
| Calcul de taux de recouvrement solaire « F » : | 78 |
| Description de méthode de f-Chart : | 78 |
| Fraction solaire f : | 79 |
| Déperditions thermiques de la boucle de captage : | 79 |
| Ecart de température conventionnel : | 80 |
| Coefficient correctif de stockage du système solaire : | 81 |
| Application de f-Chart pour le calcul de taux de recouvrement f: | 81 |
| Consommations énergétiques du système solaire + appoint : | 82 |
| Performance du système solaire + appoint:..... | 82 |
| Dispositifs d'appoint : | 82 |
| Analyse des résultats : | 84 |
| Calcul du rayonnement solaire : | 84 |
| Rayonnement quotidien horizontal et rayonnement extraterrestre : | 84 |
| Rayonnement global reçu G : | 85 |
| Besoins bruts mensuels : | 86 |
| Pertes mensuelles de transmission entre le ballon solaire et l'appoint : | 86 |
| Calcul de taux de recouvrement solaire « f » : | 87 |

Liste des figure

Figure I.1:distribution du rayonnement solaire annuel dans le globe (KWh/m 2année)**Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.2 : Schéma explicite de la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique.

..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.3: Miroir parabolique concentrateur. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.4: Centrale solaire en Californie. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.5: Cellules photovoltaïques **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.6: les différentes zones énergétiques de l'Algérie... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.7: Système de production d'eau chaude domestique(Thermosiphon)**Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.8:Schéma d'un système solaire résidentiel typique. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.9:Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur**Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.10:Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.11: Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés**Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.12: Travail en coupe des ouvertures et programmation des apports solaires lumineux et thermiques **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.13 : **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.14:Schéma de principe du mur capteur **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.15:Schéma de principe de capteur a air **Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.16:Principe de fonctionnement de l'isolation transparente**Erreur ! Signet non défini.**

Figure I.17:Eléments d'une façade double peau **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.1:capteur solaire thermique **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.2:schéma d'un capteur solaire sans vitrage **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.3:Capteurs solaires plans avec vitrage **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.4: schéma d'un capteur à tube sous vide **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.5: composant d'un capteur solaire plan..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.6: Flux d'énergie dans un capteur solaire **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.7: les différents modes de transfert thermique **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.8: circuit analogique **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.1:schema reprente un systeme solaire **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.2: Différents angles utilisés pour le repérage du soleil**Erreur ! Signet non défini.**

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure III.3: Équation du temps | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.4:les différents types des rayonnements solaires... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.5:diagramme de K_t | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.6:isolation des conduites | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.7:schema d'un circulateur | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.8:échangeur interne..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.9:modèle d'un clapet anti-retour | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.10: Ballon de stockage solaire standard..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.11: diagramme de Moody | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure IV.1: code de calcul le rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure V.1: <i>Evolution des irradiances solaire</i> | Erreur ! Signet non défini. |

Liste des tableaux

| | |
|--|------------------------------------|
| Tableau I.1:Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.1:Les données géographiques | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.2 : Les rayonnements solaires reçus sur un plan incliné | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.3: La demande moyenne en eau chaude sanitaire | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.4:Les températures mensuelles..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.5:les besoin de chauffage d'eau | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.6:les pertes mensuelles de stockage | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau IV.7:les résultats de la méthode de f Chart | Erreur ! Signet non défini. |

Introduction :

Le confort domestique apporté par le chauffage des habitations et l'utilisation de l'eau chaude est une exigence de la vie moderne. En effet, la qualité de vie d'un individu est liée directement à la quantité d'énergie consommée. L'Homme moderne ne se limite plus aux besoins de survie ; il cherche constamment davantage de confort et de bien-être ; Pour cela on doit adapter le bâtiment au mode de vie des futurs habitants mais le problème de Fournir de l'énergie propre en quantité suffisante et à un bon prix, constitue de nos jours un impératif majeur pour le développement de toute nation. En effet, l'augmentation de la demande en Energie, la détérioration accélérée de l'environnement liée aux résidus des ressources énergétiques utilisées, posent de sérieux problèmes à l'échelle globale. L'impact socioéconomique de ces problèmes ne peut que s'intensifier à court et moyen terme.

Cas de l'Algérie La consommation globale d'énergie, a été augmentée entre l'année 2009 et 2010 de 30.9MTEP à 31.64MTEP (statistiques Ministère d'énergie et des mines), Sachant que le secteur ménage qui domine de l'ordre de 45.7%, suivi du secteur des transports de 27.8% et ensuite industriel BTP de 26.8%. La consommation d'énergie finale sera augmentée de 203,4% entre les années 2010 et 2040(statistique MEM).

La consommation d'électricité et de gaz des ménages par rapport aux autres secteurs a connu une augmentation à 36.75 %, cette augmentation est due :

- à l'expansion en surface (plus de constructions)
- coût de l'électricité et du gaz qui est resté gelé durant 1963-1989

Face à cette évolution rapide de la consommation d'énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), et face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites " renouvelables " et notamment vers la plus ancienne, le soleil, qui déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole). Cette valeur est à comparer aux 9,58 milliards de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (1998).

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.

Notre travail " chauffe –eau solaire pour immeuble urbaine et climat littoral est l'un des applications de l'énergie renouvelable et a pour but de diminuer la consommation de l'énergie primaire Utilisé pour la chauffe d'eau sanitaire qui représente 15 % de l'énergie de ménage.

CHAPITRE I :

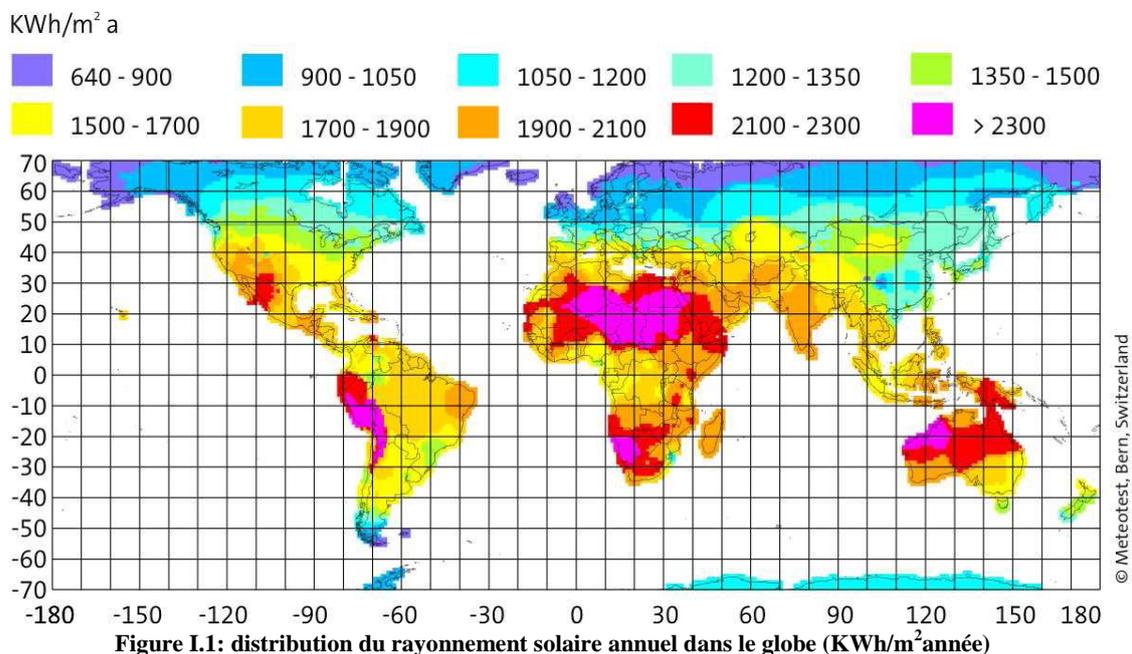
GENERALITES

CHAPITRE I: GENERALITES

Énergie solaire:

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre, qui se trouve à une distance d'environ 150 million Km de notre planète, avec un diamètre 1 300 000 fois plus grand que celui de la terre et une espérance de vie de 5 à 10 milliards d'années, donc le soleil est pratiquement une source d'énergie inépuisable pour l'homme. Il est à l'origine de plusieurs processus vitaux et de plusieurs formes d'énergie sur terre, cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice.

L'énergie solaire est produite par le rayonnement du soleil, direct ou diffus à travers l'atmosphère, le reçoit de cet énergie chaque année sur la terre équivaut à plus de 20 fois nos besoins énergétiques (d'après HESPUL). Globalement la terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt, dont elle absorbe 122 et réfléchit le reste. L'énergie totale absorbée sur une année est donc 3 850 Zetta joules (10^{21} joules, ZJ) ; par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ, le vent contient 2.2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0.5 ZJ dont 0.06 ZJ sous forme d'électricité [2]. Les zones désertiques, où la nébulosité est faible et qui sont situées sous des latitudes proches de l'équateur, sont les plus favorables à l'énergie solaire. L'image ci-dessous montre la distribution du rayonnement solaire annuel sur les différents pays du globe.



L'Homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou énergie de la biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'énergie électrique et l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière. On distingue plusieurs types d'énergies solaires.

Le solaire passif :

La plus ancienne et certainement la plus importante, utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, surface vitrée orienté vers le Sud etc.). L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment. Dans une maison solaire passive, l'apport solaire passif permet de faire des économies d'énergie importantes.

Le solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à obtenir de l'énergie calorifique à partir du rayonnement solaire en utilisant des panneaux solaires pour chauffer un fluide caloporteur généralement (La Mono propylène-glycol), en suite ce dernier chauffe un réservoir d'eau à l'aide d'un échangeur de chaleur, soit pour produire de la vapeur pour actionner une turbine (solaire thermodynamique), soit pour produire de l'eau chaude pour des besoins de chauffage (solaire domestique).

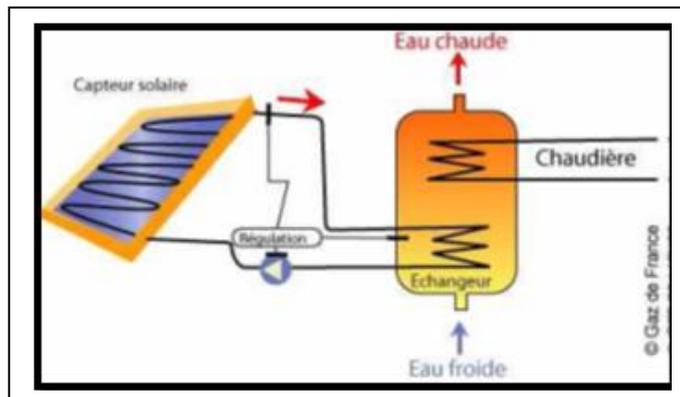


Figure I.2:Schéma explicite de la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique.

Solaire thermodynamique ou industriel :

A l'aide de miroirs concentrateurs qui réfléchissent les rayonnements solaires et les concentrent sur un espace réduit appelée (cavité réceptrice) ou en utilisant plusieurs panneaux solaires, là ou ont fait passer un fluide caloporteur pour le chauffer et augmenter sa température ensuite ce fluide passe dans un échangeur de chaleur pour faire chauffer de l'eau qui se trouve dans un réservoir jusqu'à l'obtention de la vapeur surchauffer sous haute pression, et cette dernière se détend à travers une turbine à vapeur qui converti l'énergie calorifique de la vapeur obtenue en énergie mécanique pour faire fonctionner une génératrice et produire de l'énergie électrique.

La conversion d'énergie se fait selon le cycle thermodynamique de Rankine sauf que la source d'énergie dans ce cas c'est le soleil. Le fluide caloporteur circule dans un cycle fermé en sortant de l'échangeur pour revenir vers le panneau, la vapeur aussi après sa détente à travers la turbine sera condenser dans un condenseur jusqu'à ce qu'elle devienne liquide puis elle sera refouler dans le réservoir de chauffage et ainsi de suite le cycle se répète .



Figure I.3 : Miroir parabolique concentrateur.



Figure I.4 : Centrale solaire en Californie.

Solaire photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photoélectrique découvert par Edmond Becquerel en 1839), Einstein aussi à publier en 1905 un article sur ce phénomène. Les photons, lorsqu'ils rencontrent une plaque métallique peuvent céder leur énergie pour libérer et faire circuler un courant électrique. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est similaire à l'effet photoélectrique, Il fonctionne bien avec le rayonnement solaire même diffus sous une couche de nuages. Le matériau d'une cellule est un semi-conducteur. Il est composé de deux couches. Les photons libèrent un électron dans la première couche et un trou chargé positivement dans la deuxième couche. Les charges ainsi créées sont canalisées pour fournir un courant électrique. La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.



Figure I.5: Cellules photovoltaïques

GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, L'Algérie possédant un gisement solaire important, de par son climat, la puissance solaire maximale en pour notre pays est d'environ 7.2 KWh/m². L'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2 500 KWh/m².

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.

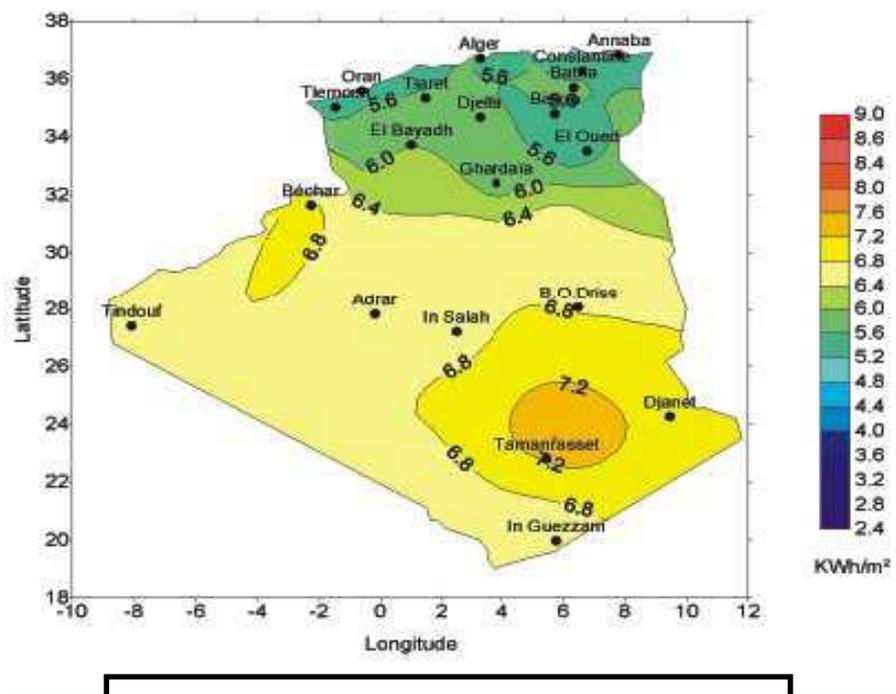


Figure I.6 : les différentes zones énergétiques de l'Algérie

Le tableau suivant représente l'ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

| Régions | Régions côtières | Hauts plateaux | Sahara |
|--|------------------|----------------|--------|
| Superficie (%) | 4 | 10 | 86 |
| Durée moyenne d'ensoleillement (h/an) | 2 650 | 3 000 | 3 500 |
| Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an) | 1 700 | 1 900 | 2 650 |

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

La durée d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3 500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant

l'été. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil. Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Par exemple les capteurs installés à Constantine sont inclinés de 37° [3].

UTILISATION L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Parmi les applications d'énergie solaire thermique en trouve :

- chauffage habitation
- production d'eau chaude sanitaire
- Chauffage solaire passif

Production d'eau chaude sanitaire

Il existe de nombreuses applications de production d'eau chaude sanitaire. L'application la plus courante est l'utilisation de systèmes de chauffage solaire d'eau chaude domestique.



Figure I.7 : Système de production d'eau chaude domestique(Thermosiphon)

Description des systèmes de chauffage solaire de l'eau

Les systèmes de chauffage solaire de l'eau utilisent des capteurs solaires et une unité de pompage pour transférer la chaleur à la charge, en général par l'intermédiaire d'un réservoir de stockage. L'unité de pompage comprend la ou les pompes (utilisées pour faire circuler le fluide caloporteur entre les capteurs et le réservoir de stockage) et des équipements de contrôle et de sécurité. Un système de chauffage solaire de l'eau convenablement conçu peut fonctionner quand la température extérieure est bien en dessous du point de congélation (zéro Celsius) et, s'il est protégé contre les risques de surchauffe, les jours chauds et ensoleillés. De nombreux systèmes ont également un chauffage auxiliaire de sorte que les

besoins en eau chaude du client sont satisfaits même lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. La **Figure 1.8** illustre les trois fonctions de base d'un chauffe-eau solaire :

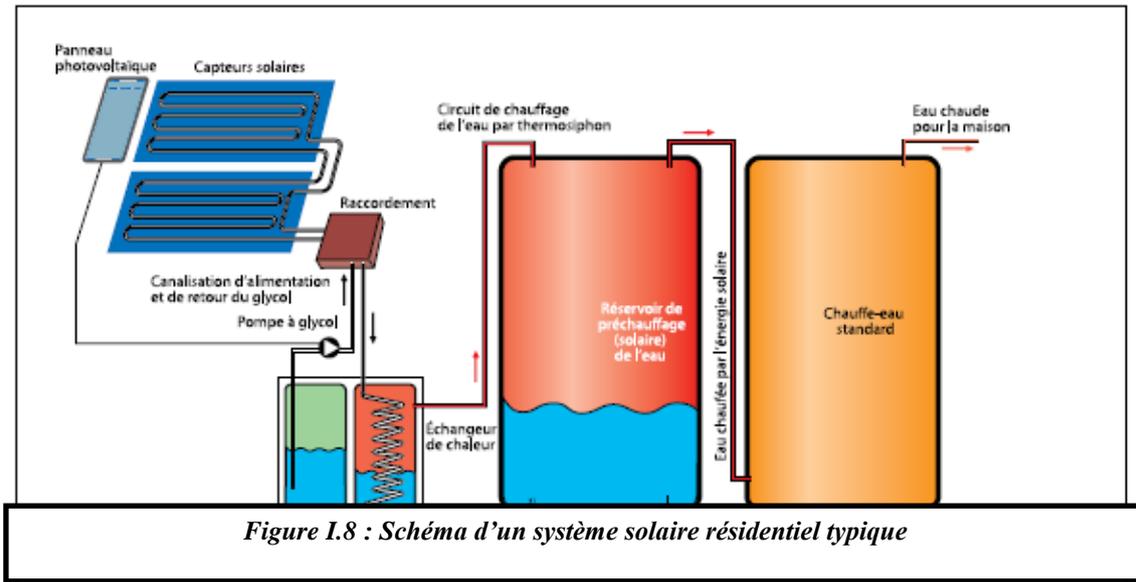


Figure 1.8 : Schéma d'un système solaire résidentiel typique

❖ **la collecte d'énergie solaire :**

Rayonnement solaire est « capté » puis transformé en chaleur par un capteur solaire.

❖ **le transfert d'énergie :**

Un fluide caloporteur transfère la chaleur générée par le capteur solaire à un réservoir de stockage thermique; la circulation est naturelle (systèmes à thermosiphon) ou forcée en utilisant un circulateur (pompe à faible tête de pression).

❖ **le stockage :**

L'eau chaude est stockée jusqu'à son utilisation dans un réservoir souvent placé dans la chambre mécanique d'un bâtiment ou en toiture dans le cas d'un système à thermosiphon.

Les types de chauffe-eau solaire :

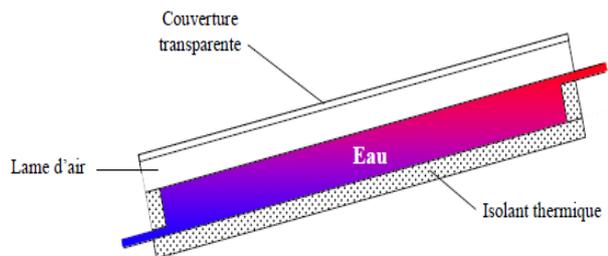
Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaire que nous allons détailler.

Chauffe-eau solaire capteur-stockeur

Ce sont des appareils qui se présentent comme des capteurs solaires à eau classiques avec coffre, vitrage, isolant et absorbeur. La contenance de l'absorbeur, de l'ordre de 75 l/m^2 permet d'assurer dans le même appareil les fonctions de captage et de stockage de l'énergie. Ces appareils sont peu encombrants, peu coûteux et faciles à installer. Ils présentent un bon rendement lors des journées ensoleillées (résistance thermique négligeable entre l'absorbeur et l'eau : contact sur toute la surface de l'absorbeur). Cependant les pertes de chaleur sont importantes la nuit et la température de l'eau le matin en période fraîche (décembre, janvier

en climat tropical sec) est souvent trop bas. Des modèles de fabrication locale bien isolés ont été testés et donnent des résultats satisfaisants. Le problème principal à résoudre est la réalisation d'un capteur plat d'une épaisseur de l'ordre de 5 mm résistant à la pression d'eau du réseau.

Figure 1.9 : Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur



Chauffe-eau solaire monobloc

Il s'agit d'appareils dont le ballon de stockage d'eau chaude est solidaire du capteur solaire comme représenté sur la figure, la circulation d'eau entre les deux éléments s'effectuant par thermosiphon.

Pour un bon fonctionnement de ces appareils, les règles suivantes doivent être respectées :

- Eviter les possibilités d'accumulation d'air en un point haut du circuit
- Placer les tubes en parallèle pour éviter les pertes de charge
- Le bas du réservoir doit être situé au-dessus du capteur
- Respecter une inclinaison minimale ($>10^\circ$, on choisit souvent 30°) pour un fonctionnement correct du thermosiphon.

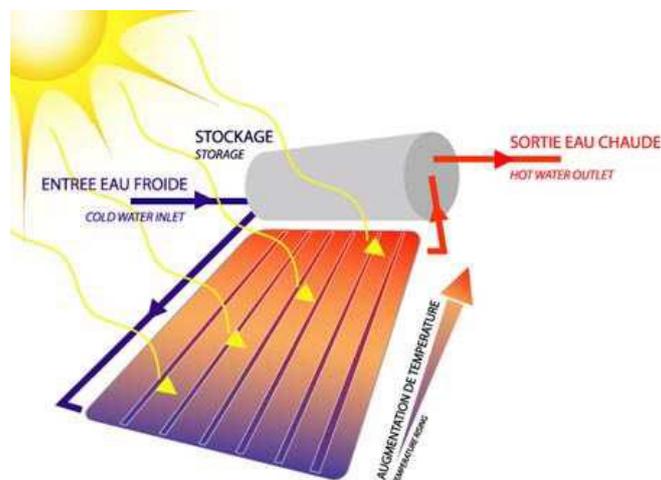


Figure 1.10 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc

Chauffe-eau solaire à éléments séparés

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation.

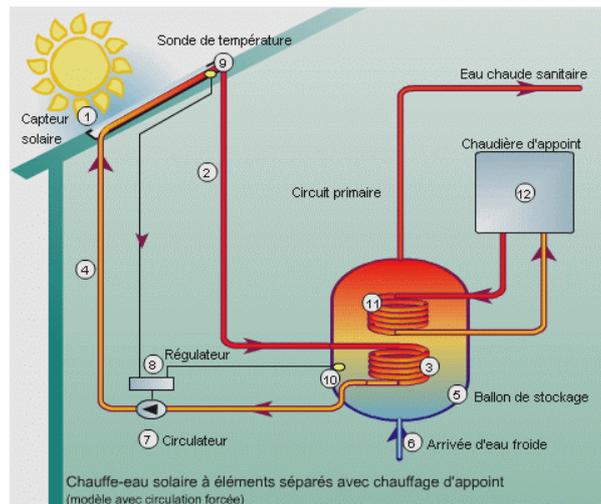


Figure I.11 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

L'architecture de solaire passive :

Les systèmes passifs les plus répandus sont la fenêtre, la véranda vitrée, la serre. L'utilisation passive de l'énergie solaire est en fait présente dans toute construction munie de fenêtres : elle consiste à laisser pénétrer le rayonnement solaire par les ouvertures transparentes, ce qui apporte à la fois lumière et chaleur. L'énergie solaire est captée et stockée dans les parties massives internes du bâtiment (dalles, plafonds, parois intérieures). La fenêtre est le capteur solaire le plus répandu et elle contribue, en l'état actuel, grâce à ses apports de chaleur, à réduire d'environ 10 % la consommation d'énergie de chauffage. La performance des systèmes passifs dépend avant tout de la qualité et de la précision de la conception architecturale. De plus, le surcoût est limité et l'encombrement spécifique nul [4].

Ouverture :

Les ouvertures, et les fenêtres qui s'y nichent, jouent un rôle important dans les relations du bâtiment et de l'occupant avec son environnement. En effet, les échanges de chaleur, les déperditions thermiques et les apports de chaleur ainsi que les apports solaires proviennent principalement des ouvertures. Celles-ci établissent le contact entre l'extérieur et l'intérieur et permettent ainsi d'améliorer le bien-être de l'occupant. Les ouvertures, et particulièrement les fenêtres, sont donc un élément majeur de tout édifice et ont toujours bénéficié de la plus grande attention des architectes.

En hiver, la pénétration du soleil par les ouvertures assure une économie d'énergie. En été, elle peut avoir l'effet opposé s'il devient nécessaire de refroidir l'habitation. L'orientation, l'inclinaison et la distribution des ouvertures sont des éléments décisifs dans la conception du projet. Sur le plan énergétique, l'orientation sud est la plus favorable en hiver (rayonnement intense) et en été (rayonnement limité, limitation des surchauffes). L'inclinaison la plus efficace se situe entre 45° et la verticale (90°) [4].

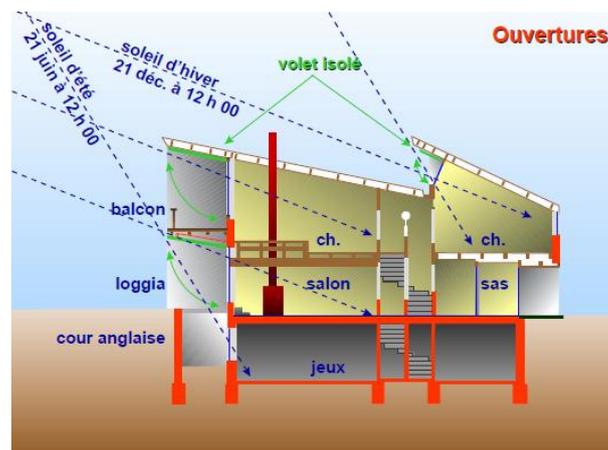


Figure I.12 : Travail en coupe des ouvertures et programmation des apports solaires lumineux et thermiques

Fenêtres :

La Figure I.13 illustre une fenêtre qui différencie ses composants sur les plans thermique et lumineux : en imposte, un vitrage fixe est protégé par un pare-soleil extérieur mobile ; au centre, les ouvrants sont constitués d'un double vitrage clair ; les allèges, quant à elles, sont redoublées par l'extérieur d'un isolant transparent, ce qui améliore la performance thermique du bas du vitrage mais permet également de mieux diffuser une partie de la lumière incidente.



Figure I.13 : quelque type des fenêtres

Murs capteurs :

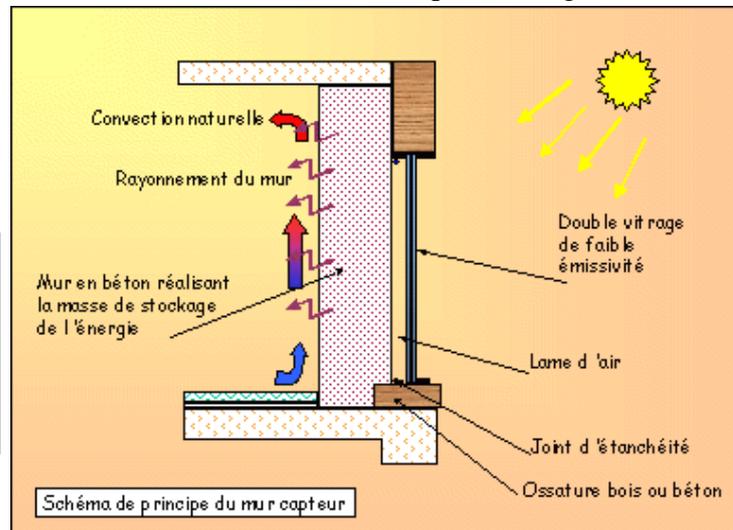
Les murs capteurs captent l'énergie solaire, l'accablent dans leur masse, l'amortissent et la restituent sous forme de chaleur à l'ambiance intérieure après un déphasage de plusieurs heures. Le mur capteur est également appelé mur Trombe d'après les premiers travaux réalisés par le professeur Félix Trombe, en 1956 Les murs capteurs sont constitués

d'une masse thermique importante, permettant l'accumulation de la chaleur, couplée à un vitrage exposé au soleil et permettant de diminuer les pertes par convection. L'énergie solaire, transmise par le vitrage et absorbée par le mur, chauffe la surface externe du mur capteur, puis la chaleur migre vers l'intérieur par conduction dans la masse du mur. La chaleur ne parvient à la surface interne qu'après un certain temps de déphasage et avec un certain amortissement. Ce déphasage dépend de l'épaisseur du mur et de la nature des matériaux. Un déphasage d'environ 6 à 8 heures permet de bénéficier de l'échauffement maximum, en face intérieure, au début de la nuit.

Capteurs à air en façade

Les capteurs à air (capteurs-fenêtres ou capteurs-murs) sont des systèmes hybrides fonctionnant tantôt en mode passif (gains solaires directs), tantôt en mode actif (stockage et pulsion d'air). Le capteur-fenêtre est composé de deux fenêtres distantes entre elles de 10 à 20 cm et l'air circulant entre ces deux fenêtres est relié à un stock thermique (lit de gravier, etc.).

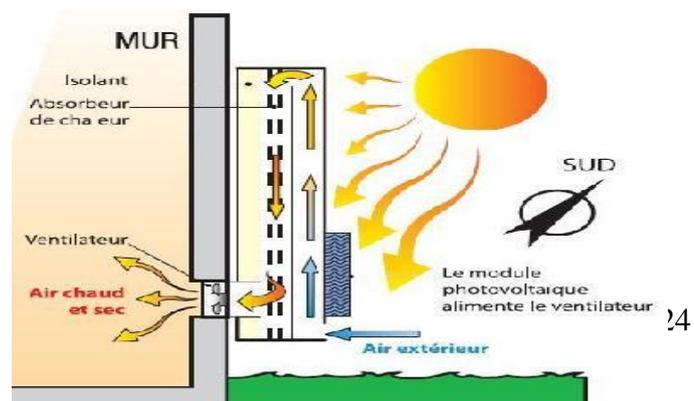
Figure I.14 : Schéma de principe du mur capteur



Par faible ensoleillement, le capteur-fenêtre se comporte comme une fenêtre ordinaire (mode passif). Lorsque le rayonnement solaire dépasse une valeur seuil (par exemple, plus de 300 W/m²), un store absorbant est mis en place entre les fenêtres ; le système devient alors collecteur et un ventilateur pulse l'air chauffé vers le stock (mode actif). La chaleur, ainsi stockée, complète la chaleur apportée par les gains solaires directs et permet de traverser de courtes périodes d'intempéries sans apport extérieur.

Le transport de la chaleur étant assuré par l'air, il faudra dimensionner un réseau de conduits isolés, munis d'un ventilateur. Une commande photovoltaïque peut assurer la mise en service des ventilateurs en mode actif et la mise en place des stores dès que le niveau d'insolation est suffisant. Le stock thermique doit être installé (verticalement ou horizontalement) au centre

Figure I.15 : Schéma de principe de capteur à air



du bâtiment, de manière à ce que ses déperditions profitent de préférence en direction des pièces froides et peu ensoleillées.

Isolation transparente

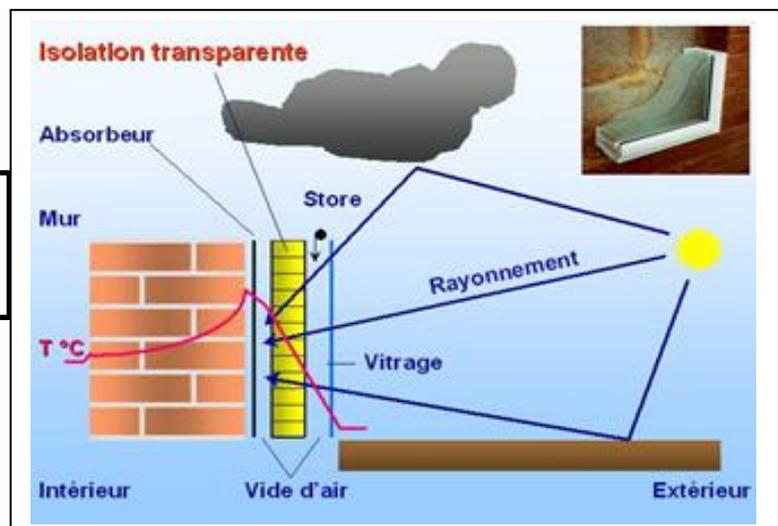
La technologie des matériaux isolants transparents (TIM) passe aujourd'hui du stade de la recherche à celui de son application commerciale. Ces matériaux se distinguent par :

- une résistance thermique élevée.
- une bonne transmission de la lumière pour une utilisation dans les systèmes de fenêtre.

Les TIM peuvent effectivement être appliqués dans des systèmes de fenêtres. Ceux développés actuellement ne sont pas transparents, mais translucides. Ils laissent pénétrer la lumière de manière très diffuse, ce qui permet d'améliorer l'éclairage en fond de pièce. L'utilisation des TIM en partie supérieure d'une fenêtre favorise une bonne diffusion. Le gain énergétique annuel d'un TIM en remplacement d'un double vitrage est de 12 à 20 m³ de gaz par m² de surface de fenêtre et on ne constate qu'une faible augmentation des surchauffes [4]. Les TIM peuvent être appliqués aux murs d'un édifice. Le rayonnement solaire est transmis à travers l'isolant et absorbé par la surface noire (absorbeur) d'un mur opaque de brique ou de béton.

La chaleur absorbée trouve son chemin à travers le mur vers l'intérieur du bâtiment tandis que le flux de chaleur vers l'extérieur est limité par les caractéristiques thermiques du matériau isolant. En effet, l'absorbeur réémet la chaleur dans une gamme de longueurs d'onde auxquelles les TIM sont quasi opaques.

Figure I.16 : Principe de fonctionnement de l'isolation transparente



Doubles peaux :

Une façade double peau est constituée d'une paroi extérieure entièrement vitrée et d'une paroi intérieure plus massive, composée de parois vitrées et de parois opaques capables d'accumuler la chaleur. La façade double peau applique les mêmes principes que ceux des serres, mais elle ne propose pas d'espace habitable. Elle est intéressante pour des orientations

proches du sud $\pm 30^\circ$; mais l'orientation ouest est à éviter pour cause de surchauffe. Le rayonnement qui traverse les deux parois vitrées procure des gains solaires directs, qui seront éventuellement accumulés dans les sols et les parois intérieurs. Le rayonnement qui frappe les parties opaques de la double peau permet aux apports solaires d'être différés de quelques heures. Quant à l'espace intercalaire entre les deux peaux, il offre un effet tampon supplémentaire puisqu'il est échauffé par les déperditions vers l'extérieur de la paroi opaque : il réduit ainsi les pertes thermiques de l'enveloppe.

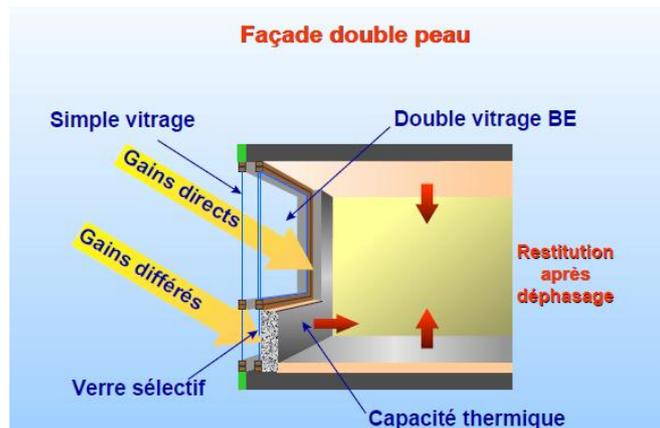


Figure I.17:Eléments d'une façade double peau

CHAPITRE II: CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE

CHAPITRE II: CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE

Principe :

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur.



Figure II.1 : capteur solaire thermique

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

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

Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers lieu d'utilisation ou de stockage.

Types de capteurs solaires :

Un capteur solaire thermique est un dispositif destiné à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur. Un capteur à circulation de liquide est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est un liquide. Un capteur à air est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est l'air, Un capteur plan est un capteur sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est sensiblement plane, L'ouverture du capteur est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentrées admis dans le capteur.

La liste suivante présente quelques-uns des types de capteurs solaires.

- Capteurs plans de types vitrés
- Capteurs plans sans vitrage
- Capteurs à plaque perforée sans vitrage
- Capteurs solaires à passage retour
- Capteurs solaires à concentration
- Capteurs solaires à air
- Capteurs solaires intégrés
- Cuisinières solaires
- Capteurs solaires à circulation de liquide
- Systèmes à réflecteur parabolique
- Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique
- Systèmes de centrale à tour
- Capteurs solaires fixes à concentration
- Capteurs sous vide

Capteur plan sans vitrage :

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer

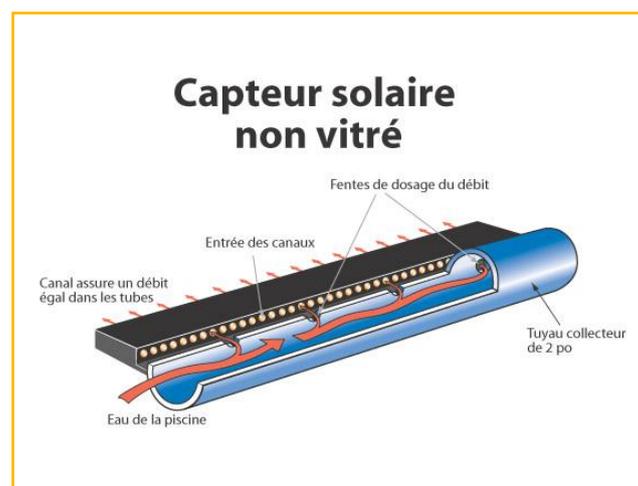


Figure II.2 : schéma d'un capteurs solaires sans vitrage

Ces capteurs de faible coût captent bien l'énergie solaire, Cependant les pertes thermiques vers l'environnement augmentent rapidement avec la température de l'eau. En conséquence, les capteurs sans vitrage sont couramment utilisés pour des applications demandant une

fourniture d'énergie à basse température (piscines, eau d'appoint en pisciculture, chaleur industrielle, etc.); dans les climats froids, ils sont habituellement utilisés exclusivement durant l'été à cause de leurs pertes thermiques élevées.

Capteur plan avec vitrage :

Dans les capteurs à liquide plans avec vitrage, comme montré à la Figure II.3, une plaque absorbante (qui souvent est recouverte d'un revêtement sélectif) est fixée dans un cadre entre un vitrage simple ou double et un panneau isolant placé à l'arrière. L'énergie solaire est ainsi emprisonnée dans le capteur à cause du vitrage (effet de serre). Ces capteurs sont couramment utilisés pour des applications à températures modérées (chauffage de l'eau sanitaire, chauffage de locaux, chauffage de piscines intérieures ouvertes toute l'année et chauffage pour procédés industriels).

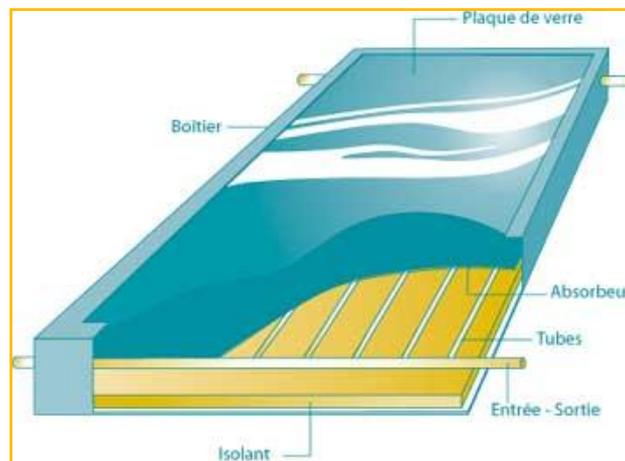


Figure II.3 : Capteurs solaires plans avec vitrage

Capteur à tube sous vide :

Les capteurs solaires à tubes sous vide, comportent un absorbeur revêtu d'une surface sélective et enfermé sous vide dans un tube en verre. Ils captent bien l'énergie solaire et leurs pertes thermiques vers l'environnement sont extrêmement faibles. Les systèmes présentement sur le marché utilisent un caloduc pour extraire la chaleur de l'absorbeur (un liquide se vaporise au contact de l'absorbeur chaud, la chaleur est récupérée dans la tête du tube lorsque la vapeur s'y condense et le condensat, retourne par gravité à l'absorbeur). Les capteurs sous vide sont bien adaptés aux applications requérant la fourniture d'énergie à des températures moyennes ou hautes (eau chaude domestique, chauffage de locaux et applications de chauffage industriel dans des gammes de températures de 60 °C à 80 °C, selon la température extérieure), en particulier dans les climats froids.

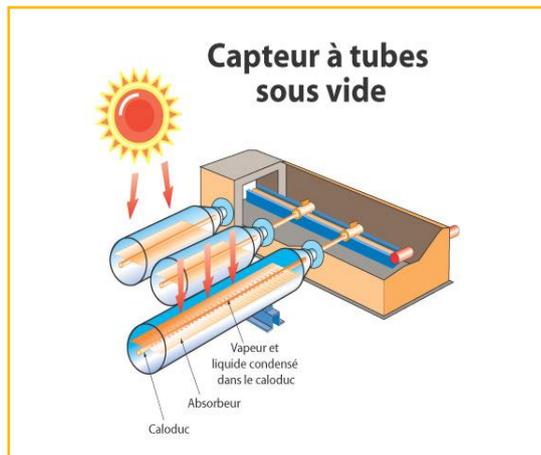


Figure II.4 : schéma d'un capteur à tube sous vide

Les différents composants d'un capteur solaire plan vitré :

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

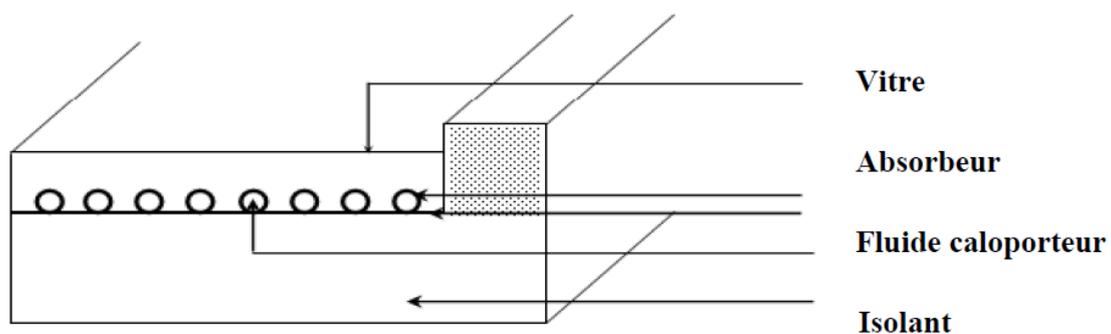


Figure II.5 : composant d'un capteur solaire plan

L'absorbeur :

L'absorbeur est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transfère l'énergie thermique. Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide thermique. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques entraine des différences notables comparées aux métaux.

Les avantages sont :

- La légèreté.
- La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.
- La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

Les inconvénients sont :

- Une mauvaise conductibilité thermique.
- Un vieillissement dû au rayonnement U.V.
- Une tenue médiocre aux températures élevées

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium, qui ont de bonnes conductibilités thermiques.

| types | Conductivité (W /m. °c) |
|-----------|-------------------------|
| cuivre | 380 |
| Aluminium | 230 |
| inox | 52 |

Tableau II.1 : conductivités thermique de quelques métaux

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact.

En général, un absorbeur efficace à une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé, de toute façon, il est important d'associer un coefficient d'absorption élevé avec un rapport facteur d'absorption/ émittance élevé. Les propriétés de certains matériaux adéquats sont données dans le tableau suivant [5].

| Couche | Facteur d'absorption (α) | Emittance (ϵ) | Facteur de performance (α/ϵ) |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|--|
| Tungstène dentritique | 0.96 | 0.26 | 3.7 |
| Silicium sur argent | 0.76 | 0.06 | 12 |
| Nickel noir | 0.90 | 0.08 | 11 |
| Chrome noir | 0.98 | 0.19 | 5.1 |

Tableau II.2 : Les propriétés de certains matériaux adéquats

Le fluide caloporteur :

Le fluide est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants :

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.

- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
 - Toute fuite est sans conséquence.
 - Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
 - Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable
- Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :
- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
 - Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ($\rho.C_p=1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) pour l'air contre $4.2.10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'eau.
 - Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

La couverture transparente :

Elle a la double fonction de laisser passer le maximum de rayonnement solaire et éviter le refroidissement de l'absorbeur en réduisant le phénomène de convection de l'air et en bloquant le rayonnement infrarouge (effet de serre).

Les matériaux les plus utilisés sont le verre trempé (pour réduire les risques d'accident en cas de bris). Les matériaux de synthèse (polycarbonate, fluorure de polyvinyle), qui ont été utilisés naguère, ont presque complètement disparu pour les raisons de prix et de tenue de au vieillissement. Des travaux sont toujours en cours dans quelques centres de recherche, pour introduire à nouveau ce type de matériaux.

Le vitrage est fixé sur le coffre du capteur soit de façon mécanique (joint étanchéité et parclose), soit collé directement sur le coffre. C'est cette dernière solution qui est mise en œuvre sur le capteur de conception récente. La transmission énergétique correspond au pourcentage du flux énergie solaire transmis directement à travers le verre.

Une partie du rayonnement solaire est réfléchi par les parois du vitrage tandis qu'une autre partie est absorbée par celui-ci, transformée en chaleur en entraînant une augmentation de sa température. Le tableau suivant représente des caractéristiques optiques des vitrages [8].

| Nature | Transmission (%) | Réflexion (%) | Absorption (%) |
|--------------|------------------|---------------|----------------|
| Verre claire | 83 | 8 | 9 |
| Verre trempé | 90 | 8 | 2 |

Tableau II.3 : les caractéristiques optiques des vitrages.

L'isolation thermique :

L'isolation thermique (arrière et latérale) évite les déperditions thermiques du capteur par conduction. Elle est constituée d'un matériau isolant qui, dans certains cas, participe à la tenue mécanique du capteur.

Dans un capteur solaire, l'isolation thermique est soumise à de très fortes contraintes .en effet, lorsque le capteur est expose a un fort ensoleillement sans circulation de fluide caloporteur, l'absorbeur peut atteindre des températures très élevés supérieures à 150°C. Ce phénomène, s'il se reproduit régulièrement, peut entraîner la destruction des isolant courants tels que les mousses se polyuréthane .Le polystyrène expansé dont la température limite d'utilisation est nettement inférieure à 100 °C, c'est à proscrire totalement.

Dans tous les cas, il est préférable d'éviter un contact direct entre l'absorbeur et l'isolant.

Les seuls isolants résistant à ces Températures sont les mousses phénoliques, peu courantes et chères, et les laines minérales (laine de verre et surtout laine de roche qui présente l'avantage de ne pas absorber l'humidité). L'isolation peut également être assurée par un complexe de deux composants (mousse de polyuréthane recouverte d'une couche de laine minérale en contact avec l'absorbeur.

Afin d'éviter que des condensateurs ne soient absorbés par l'isolant en laine minérale, il est judicieux de disposer, à la surface de celui-ci, une feuille d'étanchéité dont le matériau doit résister à la température de stagnation de l'absorbeur. Il important également que sa matière soit compatible avec celle de l'absorbeur afin d'éviter des couples électrolytiques (éviter le contact aluminium-cuivre par exemple).

| Types | Conductivité (W/m. °C) |
|-----------------------|------------------------|
| Laine de verre | 0.041 |
| Laine de roche | 0.050 |
| Polystyrène | 0.039 |
| polyuréthane | 0.027 |

Tableau II.4 : conductivités thermique des certains éléments

Coffre :

Il assure la protection à l'arrière du capteur et participe à sa rigidité.

On peut distinguer deux grands principes de construction :

Les coffres monoblocs (par exemple en tôle pliée ou en matériaux composite) dont la géométrie assure la tenue mécanique de l'ensemble de capteur.

Les ensembles constitue de profilés périphérique (souvent an aluminium) sur lesquels est fixée une protection (feuille de métal ou de matière de plastique) qui assure l'étanchéité arrière.

Les matériaux le plus utilisé, pour constituer le fond du coffre sont le métal (tôle d'acier pré laquée ou d'aluminium) et les matières plastiques [ABS (poly (acrylonitrile-butadiène-styrène)), polyester].

Ils doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Bonne tenue à la corrosion

- Faible prix de revient
- Transformation facile

Les points de fixation des capteurs sur leurs supports font partie le plus souvent du coffre de capteur. Ces éléments doivent permettre de résister aux efforts à l'arrachement induits par le vent.

Classification des capteurs :

On peut classer les capteurs selon :

Le fluide de travail utilisé :

On peut trouver :

❖ Des capteurs solaires à air :

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires, et le chauffage des locaux

❖ Des capteurs solaires à eau :

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire).

Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à :

- Faible pression de circulation, tel est le cas du chauffage des piscines.
- Haute pression de circulation où le circuit d'eau est généralement constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

L'eau et l'air sont les principaux fluides de travail utilisés pour les capteurs solaires plans, mais il en existe d'autres, tels que les hydrocarbures qui sont utilisés pour la réfrigération et la génération d'électricité.

L'orientation des capteurs :

Les capteurs solaires peuvent être

❖ Des capteurs fixes :

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- La simplicité et la fiabilité.
- Un faible entretien.
- Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).

- L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité
- ❖ Des capteurs à poursuite :
Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.

Les types des composants :

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivant :

La couverture

On peut alors trouver :

Les capteurs solaires plans non vitrés :

Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U.V, sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été et assurent des températures relativement basses de l'ordre de 30 à 35°C.

Les capteurs solaires plans vitrés :

Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement. Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

L'absorbeur

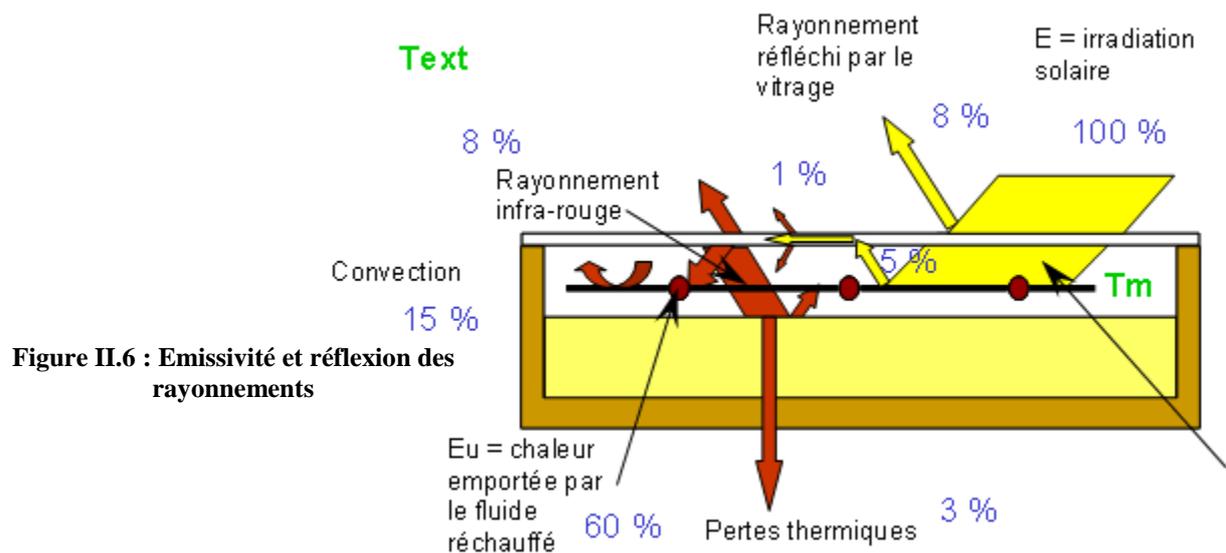
L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :

Les absorbeurs plans.

Les absorbeurs à cavités.

Fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple. Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur



captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur. Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre. L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement.

Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires :

On peut les classer en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes. Les paramètres externes sont :

Paramètre d'ensoleillement : éclairage énergétique dû au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation.

Température extérieure sèche.

Vitesse du vent sur le capteur.

Les paramètres internes sont :

Paramètres géométriques :

Paramètre de position : inclinaison, orientation du capteur.

La superficie du capteur qui représente un paramètre important.

Les dimensions des différentes parties : épaisseur, longueur et largeur.

Bilan thermique du capteur plan vitre

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$q'_a = q'_u + q'_p + q'_s \quad (\text{II.1})$$

q'_a : désigne le flux solaire absorbé.

q'_u : est le flux utile récupéré par le fluide caloporteur.

q'_p : est le flux perdu par le capteur.

q'_s : est le flux stocké sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

$$q'_s = M_e \times C_{eau} \times \frac{dT}{dt} \quad (\text{II.2})$$

M_e : Masse en eau du capteur.

T : Température moyenne du capteur.

t : Temps.

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$q'_{sp} = \tau_{cp} \times \alpha_{ps} \times G \times S \quad (\text{II.3})$$

q'_{sp} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W).

G : Eclairement solaire incident sur le capteur (W/m^2).

α_{ps} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.

τ_{cp} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire.

S : Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$q'_u = q'_{cf} * (T_c - T_f) \quad (\text{II.4})$$

q'_{cf} : Débit calorifique du fluide caloporteur = débit massique x capacités calorifique.

T_f : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

T_c : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\dot{q}_p = h_p * (T_{pm} - T_a) * S \quad (\text{II.5})$$

h_p : Coefficient global de pertes du capteur.

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante.

T_a : Température de l'air extérieur (ambient).

Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

Le rendement global : [13]

$$\eta = \frac{\dot{q}_u}{G A_c} \quad (\text{II.6})$$

Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_{sp}} \quad (\text{II.7})$$

Le rendement optique :

$$\eta_0 = \frac{\dot{q}_{sp}}{G} \quad (\text{II.8})$$

Paramètres de fonctionnement du capteur solaire:

La température d'entrée du fluide dans le capteur.

Le débit du fluide caloporteur.

La température des différentes parties du capteur.

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi les différents types de capteur, dont entre autres : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur.

Paramètres de performance des capteurs solaires :

L'énergie utile q_u délivrer par un capteur solaire plan de surface A_c (en négligeant les effets transitoires) peut être donnée aussi par :

$$q_u = A_c F' [G \eta_0 - U_m (T_{cm} - T_a)] \quad (\text{II.9})$$

F' : Facteur d'efficacité du capteur qui représente la mesure du transfert de chaleur entre le fluide et l'absorbeur.

η_0 : Efficacité optique c'est le produit de la transmissivité t du couvert (vitre) par l'absorptivité α de l'absorbeur $\eta_0 = \tau\alpha$

U_m : Coefficient globale de perte de chaleur du capteur [$W/m^2\text{°C}$]

T_{cm} : Température moyenne du fluide dans le capteur [°C]

T_a : Température ambiante [°C]

G : Intensité des radiations solaire dans le plan du capteur [W/m^2]

Cependant la température T_{cm} n'est pas connue alors l'équation précédente est remplacée par l'équation : (Hottel whillier Bliss) [12]

$$q_u = A_c F_R [G \eta_0 - U_m (T_{fe} - T_a)] \quad (\text{II.10})$$

Ou :

T_{fe} : Température d'entrée du fluide dans le capteur [°C]

F_R : Facteur caractérisant les pertes thermique du capteur, il représente le rapport du transfert actuel de chaleur au maximum du transfert possible, c'est la mesure des performances du capteur comme un échangeur de chaleur.

F_R est lié à F' par la relation suivante : [14]

$$\frac{F_R}{F'} = \frac{(mCp)_c}{A_c F' U_m} \left[1 - \exp \left(\frac{-A_c U_m F'}{(mCp)_c} \right) \right] \quad (\text{II.11})$$

m_c : Débit de fluide passant a travers le capteur [kg/s]

C_p : Coefficient spécifique de transfert de chaleur du fluide [$W/m^2\text{°C}$]

L'avantage d'utilisé l'équation (II.10) par rapport à l'équation (II.9) est que la température d'entrée du fluide (T_{fe}) est généralement connu ou spécifiée au contraire de (T_{cm}).

La spécification de $F_R \eta_0$ et $F_R U_m$ permet d'estimée q_u avec les variations des conditions climatiques.

L'énergie globale captée par le fluide passant à travers le capteur est : [13]

$$q_u = m C_p (T_{c0} - T_{f0}) \quad (\text{II.12})$$

A partir de laquelle la Température de sortie du fluide T_{c0} peut être calculée.

Les paramètres de performances des capteurs plan $F_R \eta_0$ et $F_R U_m$ peuvent être calculé théoriquement à partir de l'analyse de base du transfert de chaleur, du faite que leur

configuration géométrique est simple, ce pendant avec l'étendu sophistication de technologie de fabrication, il est préférable de déterminer ces paramètres expérimentalement par des essais. En effet même pour les capteurs de simple configuration les essais expérimentaux sont essentiels du fait de l'écart entre les résultats théorique et pratique qui peuvent avoir lieu.

La procédure la plus utilisée est les essais en état stationnaire, ou des mesures sont effectuées à partir du débit, température d'entrée du fluide dans le capteur, température ambiante de l'air et des radiations incidente dans le plan du capteur. Le rendement du capteur sous radiations solaires normales donner par l'équation (II.6) peut être écrire :

$$\eta = \frac{mCp(T_{c0}-T_{f0})}{G A_c} \quad (\text{II.13})$$

$$\eta = \frac{mCp(T_{c0}-T_{f0})}{G A_c} \quad (\text{II.14})$$

$$\eta = F_R \eta_n - F_R U_m \frac{(T_{f0}-T_{fe})}{G} \quad (\text{II.15})$$

A partir des données des essais, les valeurs de η_c en fonction du terme température $\frac{(T_{f0}-T_{fe})}{G}$ sont calculées puis une courbe est établie de ces données de laquelle les valeurs de

$F_R \eta_n - F_R U_m$ peuvent être déduites. [15]

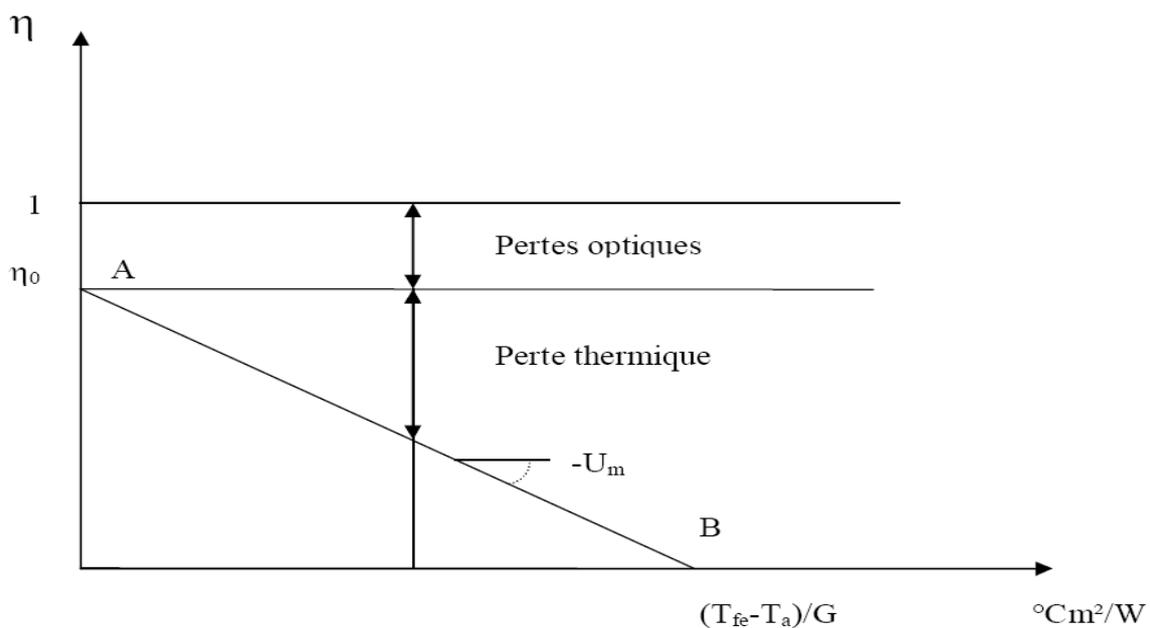


Figure II.7 : Caractéristiques et fonctionnement des capteurs solaires plans.

Le rendement est maximum au point A.

L'intersection (extrapolation) de la courbe d'efficacité avec l'axe des Y donne

$$\eta_0 = F_R \eta_n = A \quad (\text{II.16})$$

Et l'intersection de la courbe d'efficacité avec l'axe des X donne la valeur B qui permet d'estimer $F_R U_m$,

$$F_R U_m = \frac{A}{B} \quad (\text{II.17})$$

Le rendement décroît linéairement suivant AB, lorsque le quotient $\frac{(T_{fe}-T_a)}{G}$ croit Cette décroissance est d'autant plus accentuée que U_m est grand, U_m est de nature essentiellement thermique est fonction des matériaux utilisés, de leur dispositions et du dimensionnement en d'autre terme du plan d'exécution du capteur. Pour un capteur donné ($F_R \eta_n$ et $F_R U_m$ connus) le rendement est d'autant plus grand que $\Delta T = T_{fe} - T_a$ est petit et G est grand.

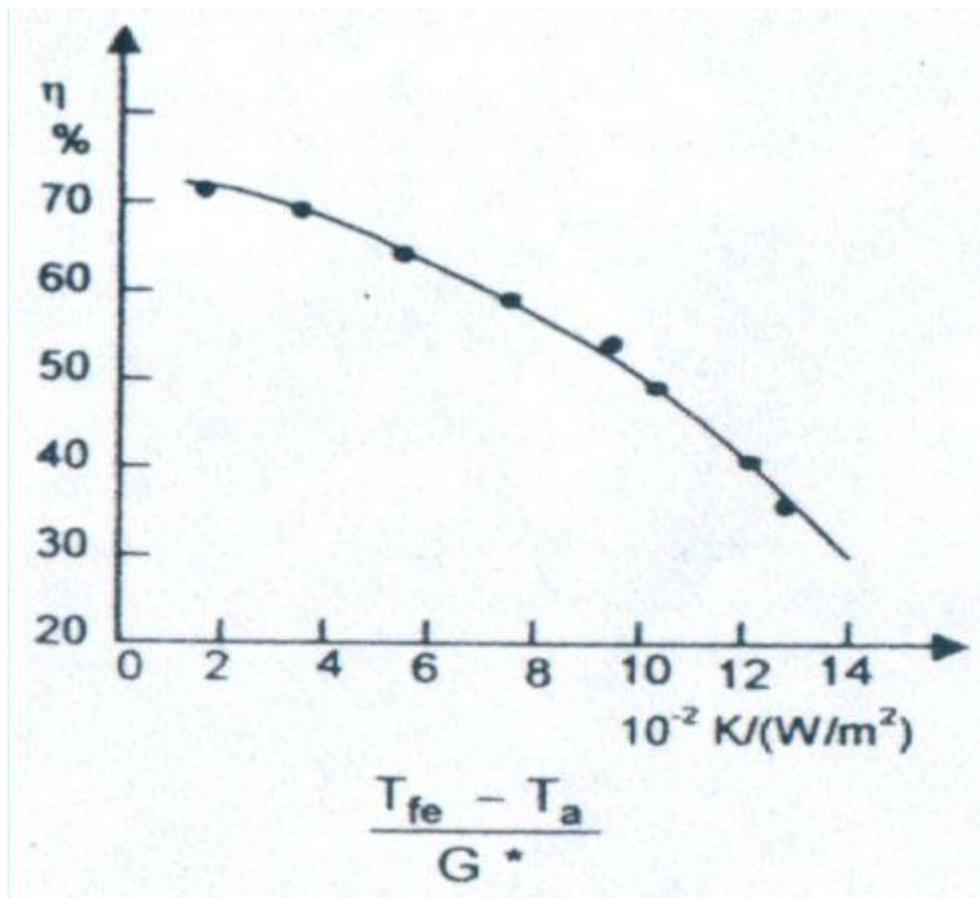
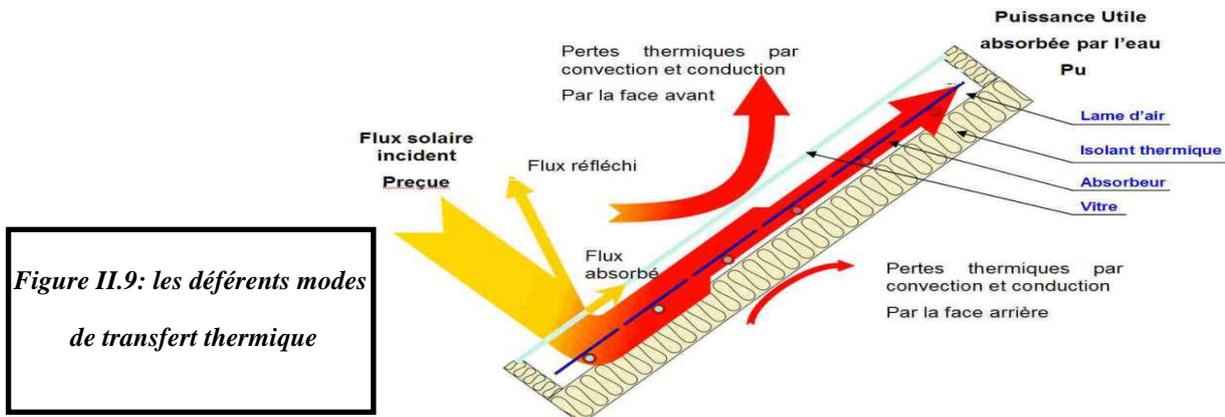


Figure II.8 : Courbe expérimentale de rendement d'un capteur plan. [14]

En réalité, le facteur de transfert thermique F_R et la conductance thermique U_m varient avec la température de fonctionnement du capteur ainsi qu'avec les conditions climatiques. Il s'ensuit une déviation de la courbe de rendement par rapport à la droite théorique Figure II.8.

Les différents modes de transferts thermiques

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



La conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière.

Loi de Fourier donnée par la relation :

$$q = -k * A * grad T \quad (II.18)$$

q : flux de chaleur.

k : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

La convection :

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

On distingue deux types de convection :

- La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur... etc).
- La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation.

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

$$q = h * S * (T_p - T_f) \quad (II.19)$$

q : le flux échangé par convection.

h : coefficient de convection.

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

T_p : température de la paroi solide.

T_f : température du fluide.

Le rayonnement :

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$q = \varepsilon * \sigma T^4 \quad (\text{II.20})$$

q : densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

T : température absolue du corps.

Pertes thermiques du capteur :

Nous diviserons le flux perdu par le capteur en deux parties :

$$q_p = q_{av} + q_{ar} \quad (\text{II.21})$$

q_{av} : est le flux perdu à l'avant du capteur.

q_{ar} : est le flux perdu à l'arrière et par les faces latérales du capteur.

Une analogie électrique nous permet de mieux représenter les différentes pertes du capteur.

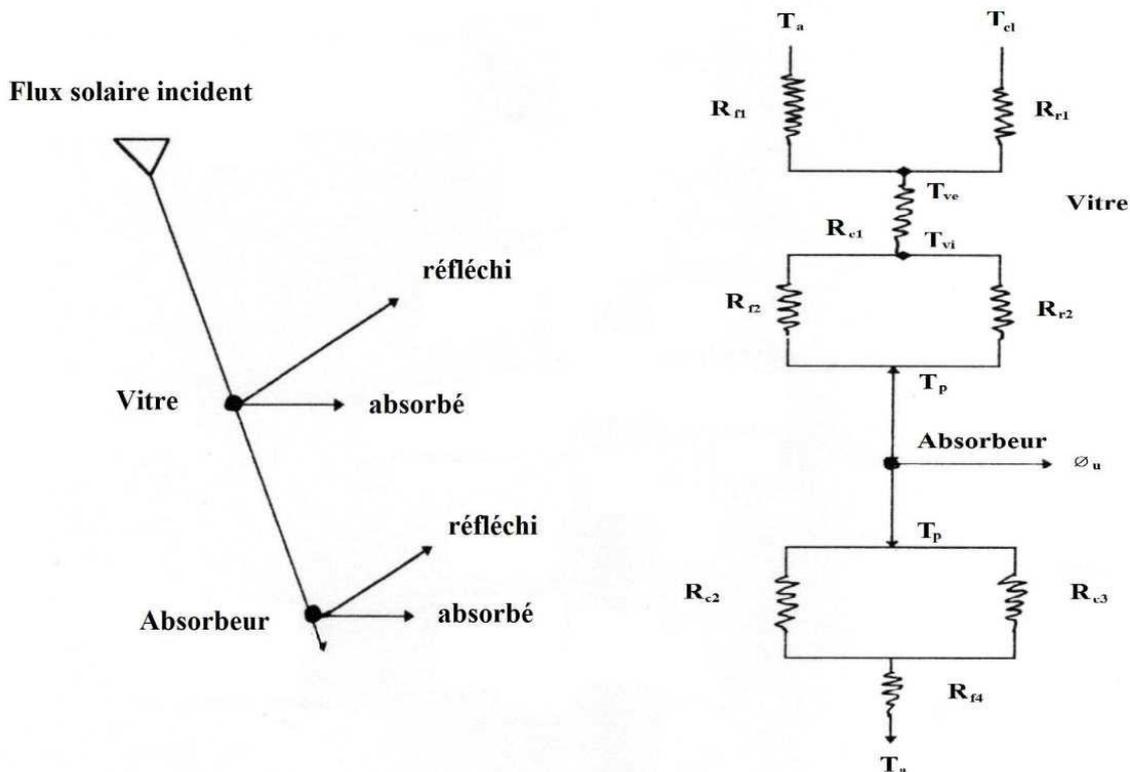


Figure II.10: circuit analogique

R_{f1} : Résistance au flux par convection entre la face extérieure du vitrage et le milieu ambiant.

R_{r1} : Résistance au flux par rayonnement entre la face extérieure du vitrage et le ciel.

R_{c1} : Résistance au flux par conduction à travers la vitre.

R_{f2} : Résistance au flux par convection entre l'absorbeur et la vitre.

R_{r2} : Résistance au flux par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre.

R_{c2} : Résistance au flux par conduction à travers les faces latérales du capteur.

R_{c3} : Résistance au flux par conduction à travers la face arrière du capteur.

R_{f4} : Résistance au flux par convection vers l'arrière et les faces latérales du capteur.

T_{ve} : Température de la face extérieure de la vitre.

T_{vi} : Température de la face intérieure de la vitre.

T_a : Température de l'air ambiant.

T_p : Température de l'absorbeur.

T_{cl} : Température du ciel. T_{cl} est estimée par la relation de Swinbank [8] :

$$T_{cl} = 0.0552 * T_a^{1.5} \quad (\text{II.22})$$

Pertes à l'avant du capteur :

On peut les diviser en deux parties :

q_{av1} : Pertes entre la vitre et le milieu extérieur.

q_{av2} : Pertes entre la vitre et l'absorbeur.

Pertes entre la vitre et le milieu extérieur :

Comme la montre la figure, il y a pertes par convection et par rayonnement.

Par convection :

$$q_{av1f} = h_{f1} * S * (T_v - T_a) \quad (\text{II.23})$$

Par rayonnement :

$$q_{av1r} = \varepsilon_v * \sigma * S * (T_v^4 - T_{cl}^4) \quad (\text{II.24})$$

Avec :

h_{f1} : Coefficient d'échange de chaleur par convection entre la vitre et le milieu ambiant.

ε_v : Emissivité du verre.

Et donc :

$$q_{av1} = (h_{f1} + h_{r1}) * (T_v - T_a) * S = \frac{(T_v - T_a) * S}{R_1} \quad (\text{II.25})$$

Où : h_{r1} est le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel.

$$h_{r1} = \frac{\varepsilon_v * \sigma * (T_v^4 - T_{cl}^4)}{(T_v - T_a)} \quad (\text{II.26})$$

et

$$R_1 = \frac{1}{h_{f1} + h_{r1}} \quad (\text{II.27})$$

Pertes entre la vitre et l'absorbeur :

Comme précédemment, il y a pertes par convection et par rayonnement.

Par convection :

$$q_{av2f} = h_{f2} * S * (T_p - T_v) \quad (\text{II.28})$$

Par rayonnement :

$$q_{av2r} = \frac{\sigma * S * (T_p^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

h_{r2} : Coefficient d'échange de chaleur par convection entre la vitre et l'absorbeur.

ε_v : Emissivité du verre.

ε_p : Emissivité de l'absorbeur.

Et donc :

$$q_{av2} = h_{f2} * S * (T_p - T_v) + \frac{\sigma * S * (T_p^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II.30})$$

Cette équation peut aussi être écrite d'une autre manière :

$$q_{av2} = (h_{f2} + h_{r2}) * (T_p - T_v) * S = \frac{(T_p - T_v) * S}{R_2} \quad (\text{II.31})$$

Où :

$$h_{r2} = \frac{\sigma * (T_p + T_v) * (T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II.32})$$

h_{r2} : est le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.

$$R_2 = \frac{1}{h_{f2} + h_{r2}} \quad (\text{II.33})$$

Bien que, la résolution d'un tel système peut se faire par ordinateur, on préfère souvent adopter l'approche de KLEIN qui a développé, en 1979, une formule empirique donnant une valeur approchée de U_{av} en se basant sur son propre travail de 1975 et sur celui de HOTTEL et WOERTZ en 1942 [7].

$$U_{av} = \left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_p} * \left[\frac{(T_p - T_a)^e}{N + f} \right]} + \frac{1}{h_{f1}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma * (T_p + T_a) * (T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591 * N * h_{f1})^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 * \varepsilon_p - N}{\varepsilon_v}} \quad (\text{II.34})$$

Où :

U_{av} : Coefficient de pertes avant [W/m².K].

N : Nombre de couvertures transparentes.

$$f = (1 + 0.089 * h_{f1} - 0.1166 * h_{f1} * \varepsilon_p) * (1 + 0.07866 * N) \quad (\text{II.35})$$

f : est un facteur tenant compte de l'effet du vent.

$$C = 520 * (1 - 0.000051 * B^2) \quad (\text{II.36})$$

et

$$e = 0.430 * \left(1 - \frac{100}{T_p}\right) \quad (\text{II.37})$$

β : Inclinaison du capteur.

ε_v : Emissivité du verre.

ε_p : Emissivité de l'absorbeur.

T_a : Température ambiante.

T_p : Température de l'absorbeur.

h_{f1} : Coefficient d'échange de chaleur par convection avec le milieu extérieur.

Pertes à l'arrière du capteur :

Les pertes à l'arrière du capteur sont données par la formule suivante :

$$q_{ar1} = \frac{S * (T_p - T_a)}{\frac{e_1}{k} + \frac{1}{h_{f4}}} = \frac{(T_p - T_a) * S}{R_{31}} \quad (\text{II.38})$$

Où :

k : Conductivité thermique de l'isolant.

e_1 : Epaisseur de l'isolant sur sa face arrière.

h_{f4} : Coefficient de transfert par convection entre la face arrière du capteur et le milieu externe.

Pertes par les faces latérales du capteur :

Les pertes perdue par les faces latérales du capteur est :

$$q_{ar2} = \left[\left(\frac{e_2}{k} + \frac{1}{h_{vent}} \right) * \frac{S}{S_{lat}} \right]^{-1} * (T_p - T_a) * S = \frac{(T_p - T_a) * S}{R_{32}} \quad (\text{II.39})$$

Où :

e_2 : Epaisseur de l'isolant sur ses faces latérales.

S_{lat} : est la surface des faces latérales du capteur.

$$R_{32} = \left(\frac{e_2}{k} + \frac{1}{h_{vent}} \right) * \frac{S}{S_{lat}} \quad (\text{II.40})$$

Alors en sommant les coefficients de pertes avant, latérales et arrière on obtient le coefficient de pertes globales U_l .

$$U_l = U_{ar} + U_{av} + U_{lat} \quad (\text{II.41})$$

On peut écrire alors que :

$$q_p = U_l * (T_p - T_a) \quad (\text{II.42})$$

CHAPITRE III : MODELISATION

Introduction:

Le model physique à étudier est divisé en deux sous-systèmes à savoir :

Systeme solaire captage et stockage.

Systeme de distribution.

Principe de fonctionnement :

Systeme solaire :

Introduction : La boucle solaire est constituée par un système de captage (capteurs solaires) et d'un réservoir de stockage relié entre eux par une tuyauterie, le fluide caloporteur est mis en circulation entre le captage et le stockage par une pompe.

Les capteurs solaires captent l'énergie solaire et la transforment en énergie thermique qui est transmis au fluide caloporteur (eau glycol), cette énergie thermique est stockée sous forme de chaleur sensible dans un réservoir jusqu'à ce qu'elle puisse être utilisée.

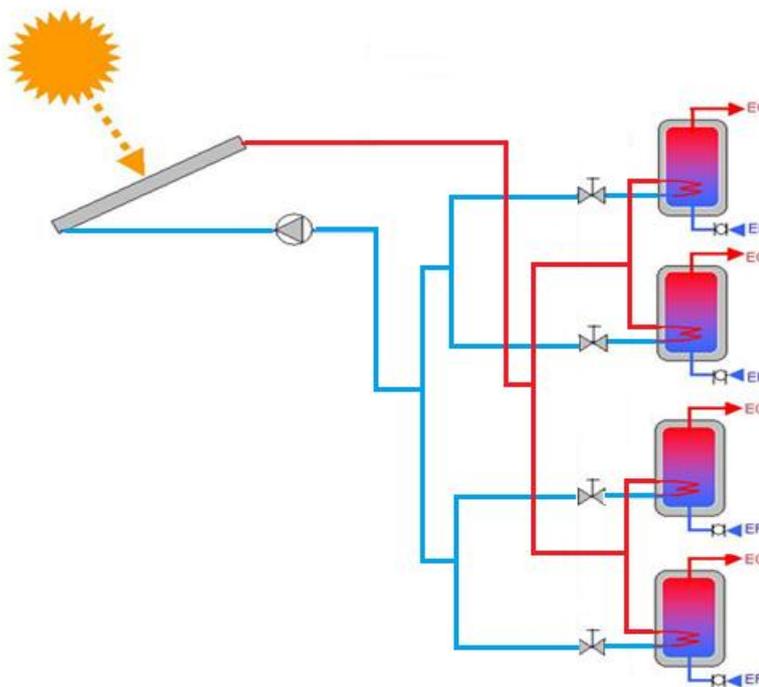


Figure III.1 : circuit de chauffe-eau solaire collectif individualisé

Système solaire de captage :

Installation des Capteurs solaires :

Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d'un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le Sud, à l'écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d'inclinaison qui permette que la surface du capteur soit exposée au maximum de lumière solaire.

Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en soustrayant la déclinaison du soleil de la latitude géographique de l'emplacement du système de chauffage solaire. En général, il s'agit de la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15 degrés. En hiver, lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison plus élevé (la latitude plus 10 à 15 degrés). Par contre, il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison moins élevé (la latitude moins 10 à 15 degrés) durant les mois d'été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel. [16]

Protection contre le gel :

Les chauffe-eau solaires conçus pour utilisation par temps froid doivent être protégés contre le gel. Dans une première méthode de prévention du gel, l'eau qui se trouve dans le circuit du capteur est évacuée automatiquement dans un réservoir au moment où la pompe s'arrête où que la température de l'eau dans la boucle chute en deçà d'un seuil de température déterminé à l'avance. Ce système s'appelle système à vidange autonome. Une deuxième méthode de protection, le transfert de la chaleur du capteur au réservoir de stockage est effectué à l'aide d'un antigel non toxique spécial par l'intermédiaire d'un échangeur thermique.

Les systèmes de chauffage solaires saisonniers, c'est-à-dire ceux qui sont destinés à ne servir qu'au printemps, en été et à l'automne, sont habituellement protégés du gel par des soupapes de retenue à bille ou des soupapes manuelles qui permettent l'évacuation et le drainage de l'eau qui se trouve dans le circuit du capteur en temps de gel.

Estimation du rayonnement solaire :

Toute étude ou application de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et détaillée du rayonnement solaire dans ce site. Ceci est généralement facile lorsque le site est pourvu d'une station de mesure météorologique. Cependant, dans la plupart des cas, il n'existe pas de mesures locales du rayonnement solaire. De ce fait, le recours à certaines méthodes appropriées, permettant de prédire les caractéristiques du rayonnement solaire et de l'estimer, est nécessaire.

Données astronomiques :

Avant d'entrer dans les détails de calcul du rayonnement solaire instantané, certains principes de base méritent d'être rappelés, notamment la définition de plusieurs données astronomiques qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

Déclinaison solaire :

La déclinaison solaire δ est définie par l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle est nulle aux équinoxes de printemps et d'automne, maximale au solstice d'été ($\delta=+23^{\circ}27'$) et minimale au solstice d'hiver ($\delta=-23^{\circ}27'$). Sa valeur en degrés tout au long de l'année, est donnée par la corrélation de Cooper [9]

$$\delta = 23.45^{\circ} * \sin \left[360 * \frac{(284+n)}{365} \right] \quad (III.1)$$

n : désigne le quantième annuel, c'est-à-dire la représentation numérique de 1 à 365.

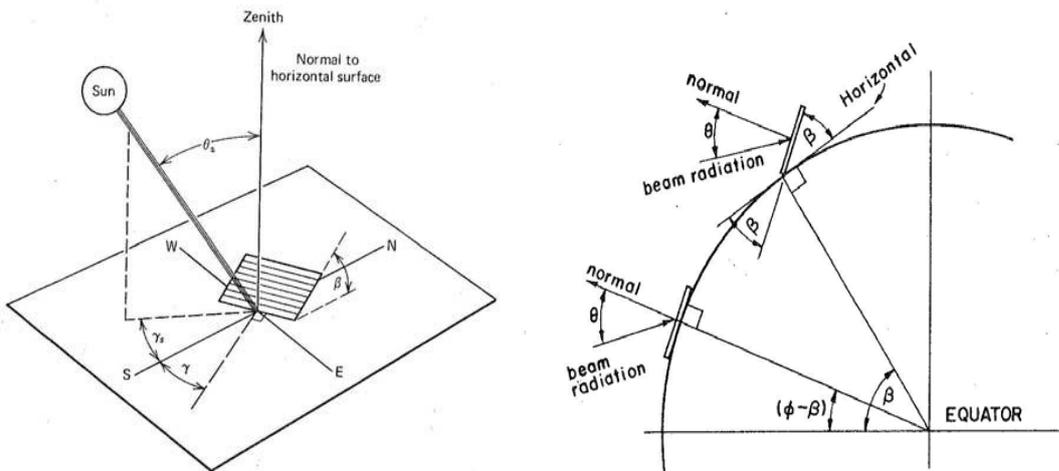


Figure III.2: Différents angles utilisés pour le repérage du soleil

Angle horaire du soleil et angle horaire de coucher du soleil :

L'angle horaire du soleil ω est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive l'après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures).

Temps solaire vrai :

On distingue le temps local et le temps solaire vrai, qui peut être déterminé selon l'équation suivante :

$$T_s = T_l + 4 * (L_{tl} + L_{lieu}) + E \quad (III.2)$$

L_{tl} : la longitude du méridien pour lequel le temps local est fixé.

L_{lieu} : la longitude du lieu en degrés ouest

T_L : le temps local correspondant au fuseau horaire

E : l'équation du temps (la correction qui résulte de perturbation de rotation de la Terre)

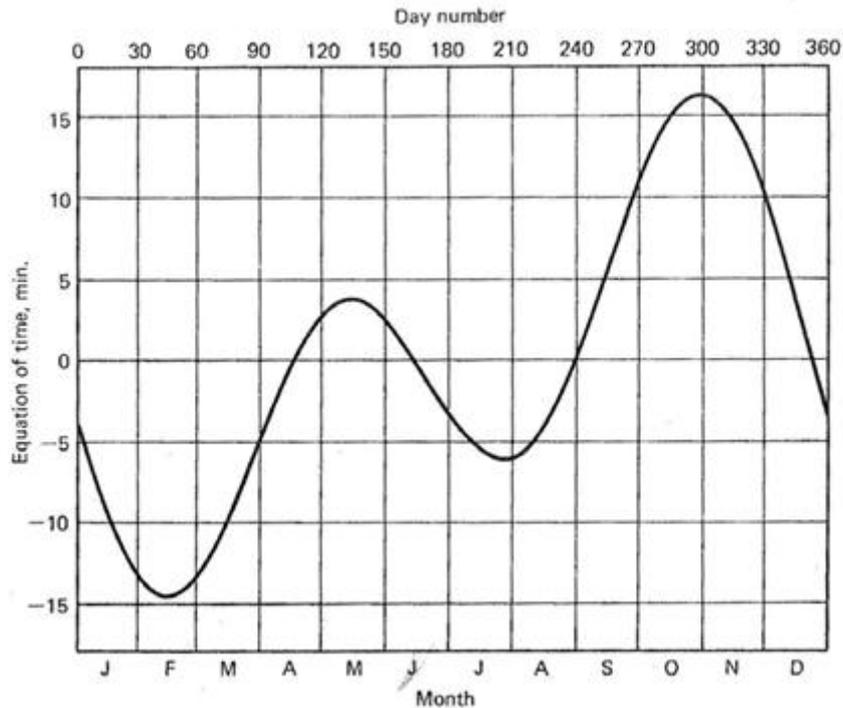


Figure III.3 : Équation du temps

L'angle horaire est lié au temps solaire vrai T_s par [8]:

$$\omega = 15 * (T_s - 12) \tag{III.3}$$

Où :

ω : est exprimé en radians et t_s en heures.

L'angle horaire de coucher du soleil ω_s est défini comme l'angle horaire du soleil à l'heure de son coucher. Il est donné par l'équation suivante [12] :

$$\cos(\omega_s) = - \tan(\varphi) * \tan(\delta) \tag{III.4}$$

δ : est la déclinaison solaire.

φ : est la latitude du lieu, précisée par l'utilisateur.

Rayonnement extraterrestre et Coefficient de transmission :

Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère. Il est donné pour le jour n par la formule suivante [8] :

$$G_0 = \frac{86400 * G_{sc}}{\pi} * \left(1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2 * \pi * n}{365}\right) \right) * (\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + \omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta)) \tag{III.5}$$

Avec:

G_{sc} : est la constante solaire égale à 1367 W/m^2 .

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé coefficient de transmission K_t (indice de clarté) est définie par [9]:

$$K_t = \frac{G_h}{G_0} \quad (III.6)$$

Avec:

G_h : est la moyenne mensuelle du rayonnement solaire quotidien sur une surface horizontale.

G_0 : est la moyenne mensuelle du rayonnement extraterrestre sur la même surface horizontale.

Les valeurs de K_t varient selon les endroits, les saisons, généralement entre 0.3 (pour des régions ou des saisons pluvieuses) et 0.8 (pour des saisons ou climats secs et ensoleillés).

Rayonnement solaire global :

Le rayonnement solaire est un rayonnement qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Donc, c'est un apport énergétique disposé quotidiennement, dont l'intensité varie selon le lieu, l'heure du jour et la saison.

Le rayonnement solaire arrivant au sol est formé de rayonnement direct et de rayonnement diffus, l'ensemble forme le rayonnement global.

Le rayonnement solaire direct se définit

comme étant le rayonnement provenant

directement du soleil. Il est donc nul

lorsque le soleil est occulté par les nuages

[8]. Le rayonnement solaire diffus résulte de la

diffraction du rayonnement solaire par les

nuages et les particules en suspension dans

l'atmosphère. Il n'est donc nul que la nuit [8].

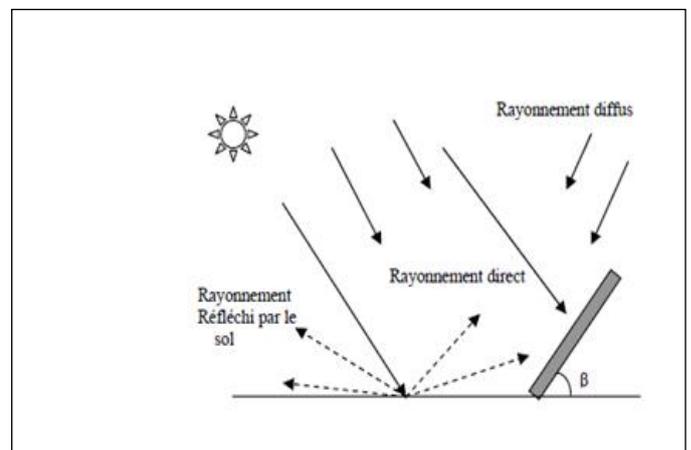
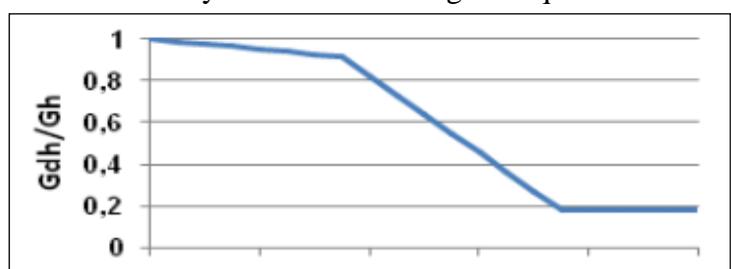


Figure III.4 : les différents types des rayonnements solaires

Estimation des moyennes mensuelles des rayonnements (diffus et direct):

En utilisant la Corrélation de Orgill et Hollands pour retrouver rayonnement direct et de rayonnement diffus partir de la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global quotidien [10].

Figure III.5: diagramme de $\frac{G_{dh}}{G_h}$



$$\frac{G_{dh}}{G_h} = \begin{cases} 1.0 - 0.249 * K_t & \text{si } K_t < 0.35 \\ 1.557 - 1.84 * K_t & 0.35 < K_t < 0.75 \\ 0.177 & \text{si } K_t > 0.75 \end{cases} \quad (III.7)$$

et $G_h = G_{dh} + G_{bh}$

G_{bh} : rayonnement solaire direct horizontal quotidien.

G_{dh} : rayonnement solaire diffus horizontal quotidien

Rayonnement direct sur une surface inclinée :

Connaissant le rayonnement direct sur une surface horizontale G_{bh} , le rayonnement direct sur une surface inclinée G_b est donné par la formule suivante [8] :

$$G_b = R_b * G_{bh} \quad (III.8)$$

G_b : représente le rayonnement direct sur une surface inclinée.

R_b : représente le rapport du rayonnement direct sur une surface inclinée à celui sur une surface horizontale. Il est donné par l'expression suivante [8] :

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (III.9)$$

Avec:

θ_z : représente l'angle de zénith, il est donné par l'équation suivante [8] :

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega)$$

θ : est l'angle d'incidence, il représente l'angle entre un rayon arrivant directement du soleil et la normale à la surface réceptrice. Pour une surface orientée vers le sud, il est donné par [8] :

$$\cos(\theta) = \cos(\varphi - \beta) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) * \sin(\delta) \quad (III.10)$$

Rayonnement diffus sur une surface inclinée :

En admettant que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire uniformément réparti sur la voûte céleste. Sa valeur est donnée par :

$$G_d = G_h * F_d \quad (III.11)$$

Avec :

G_d : représente le rayonnement diffus sur une surface inclinée.

F_d : représente le facteur d'angle plan incliné-ciel, il est donné par [8] :

$$F_d = \frac{1}{2} * (1 + \cos(\beta)) \quad (III.12)$$

Ce qui donne :

$$G_d = \frac{1}{2} * G_h * (1 + \cos(\beta)) \quad (III.13)$$

Rayonnement provenant de la réflexion :

Le rayonnement diffusé par le sol, souvent très inférieur au rayonnement diffus du ciel, et il est donné par [12] :

$$G_r = \rho * F * G_h \quad (III.14)$$

Avec :

G_r : représente le rayonnement solaire reçu par une surface inclinée provenant de la réflexion sur le sol.

ρ : représente le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol (aussi appelé albédo du sol). Sa valeur est fixée.

F : représente le facteur d'inclinaison du rayonnement réfléchi.

il est donné par :

$$F = \frac{1}{2} * (1 - \cos(\beta)) \quad (III.15)$$

Connaissant maintenant les trois composants du rayonnement solaire sur une surface inclinée
Donc, le rayonnement solaire global sur une surface inclinée G est donné par :

$$G = G_b + G_d + G_r \quad (III.16)$$

G : rayonnement global sur une surface inclinée.

Système de stockage :

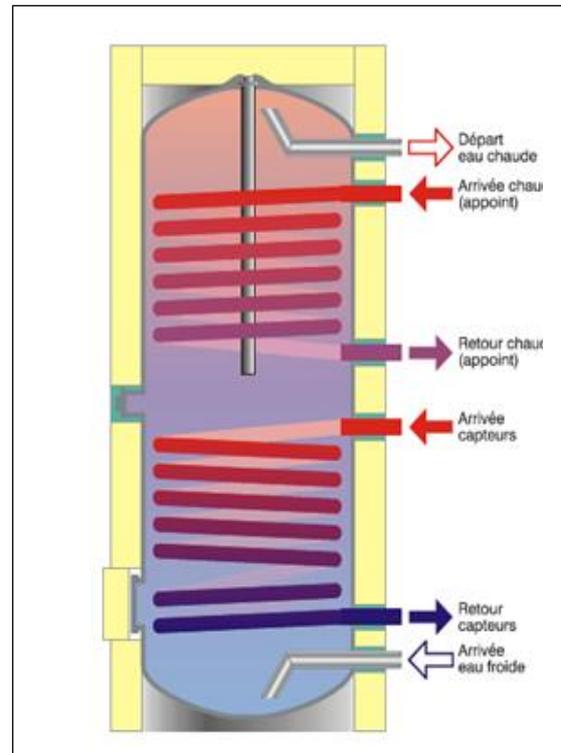
Le ballon de stockage a pour la fonction d'emmagasiner l'énergie solaire captée en vue de lisser le déphasage les apports solaire et utilisation de l'énergie .Il est généralement abrité dans un local Technique fermé.

La Figure III présente un ballon de stockage solaire standard. Il présente les caractéristiques suivantes :

- échangeurs de chaleur
- connexion directe à la conduite d'eau potable,

- pression de fonctionnement du ballon : 4 à 6 bars.

Figure III.6 : Ballon de stockage solaire standard



Dimensionnement du stockage :

Le dimensionnement du stockage ne peut se faire indépendamment du dimensionnement de la surface de de capteur et du profil de consommation journalier :

Pour une surface donnée de capteur il existe un optimum de stockage (c'est-à-dire donnant une productivité et un taux de couverture maximum).

La capacité unitaire des ballons est a choisis dans la gamme standard du commerce.

Pertes thermiques de stockage :

Les pertes thermiques Q_w du réservoir de stockage sont données par [11]:

$$Q_w = (UA)_s(T_s - T_a) \quad (III.17)$$

(UA) : est la perte thermique totale du réservoir de stockage par unité de différence de température [W/°C].

U : Coefficient de perte thermique du réservoir de stockage [W/m²°C].

A : Surface du réservoir de stockage [m²]

T_a : Température ambiante de l'air.

T_s : Température du fluide à l'intérieur du réservoir de stockage [°C]

Systeme de distribution :

La distribution de la chaleur vers la clientèle est assurée par un réseau de conduites enterrées de caractéristique répandant aux contrainte thermique .Elles ont dotées d'une couche isolante pour limiter la perte thermique

La distribution se fait par une boucle fermée. De l'eau chaude saturée part du réservoir de la station de production puis retourne à une température moyenne après être passée dans échangeur de chaleur du côté du client.

Circuit primaire (solaire) :

Le rôle du circuit primaire est de véhiculer la chaleur des capteurs solaires vers le stockage, le plus efficacement possible et en toute sécurité.

Circuit primaire classique (sous pression) :

Dans le cas des circuits primaires sous pression classique, le circuit primaire est composé des éléments suivants :

- les conduites, qui transportent le fluide caloporteur et relient les capteurs (généralement en toiture) au ballon de stockage (souvent en cave),
- le fluide caloporteur, chargé de transporter la chaleur,
- la pompe qui fait circuler le fluide caloporteur dans le circuit primaire,
- l'échangeur de chaleur solaire qui transfère la chaleur du fluide caloporteur vers l'eau stockée dans le ballon,
- les éléments utilisés pour le remplissage, la vidange et le dégazage,
- les organes de sécurité, assurant une protection contre les surpressions et les variations de volume.

Conduites circuit solaire :

Le cuivre est le matériau le plus utilisé pour le transport de chaleur entre capteurs et stockage. Il est disponible en barres de 5 m ou, pour des diamètres jusqu'à 22 mm, en rouleaux de 25 à 50 m. Pour les raccords cuivre-cuivre, il existe une grande quantité de pièces en cuivre ou en laiton. A proximité des capteurs on utilise souvent des flexibles en acier inoxydable. Les grandes installations sont souvent équipées (pour des raisons de coût) de conduites en acier. En aucun cas les conduites ne peuvent être exécutées en acier galvanisé étant donné la corrosion résultant de sa mise en contact avec les liquides caloporteurs à base de glycol.

Isolation des conduites :

Peu d'attention est généralement portée à l'isolation des conduites dans les installations chauffage traditionnelles. Dans le cas des installations solaires, l'isolation des conduites (du circuit primaire en particulier) est un aspect fondamental sous peine de voir chuter dramatiquement le rendement du transport de chaleur.

Pour une tuyauterie de cuivre de 18 mm de diamètre, il faut compter au minimum un isolant de 30 mm d'épaisseur ; pour des diamètres plus importants, 40 mm et plus.



Figure III.7: Isolants thermiques pour conduites à haute température

Le matériau utilisé doit présenter une conductivité thermique maximale de $\lambda \leq 0.035$ W/m/K et doit résister à des températures de l'ordre de 150 à 170°C.

L'isolation doit être continue au niveau des raccords, vannes et autres éléments de conduite. Les tronçons de conduites isolées placées à l'extérieur doivent être protégées : du rayonnement ultra-violet, des intempéries et de l'attaque des oiseaux (gaine métallique). A côté des combinaisons artisanales classiques associant tuyauterie, isolant et câble électrique séparés, sont apparus depuis quelques années des produits préfabriqués. Il s'agit de doubles conduites (départ et retour du circuit solaire) en cuivre ou en acier inoxydable noyées, parallèlement au câble électrique de la sonde de température, dans une mousse isolante. Le tout est enrobé d'une gaine protectrice synthétique.

Ces produits proposés en différentes longueurs et pour différents diamètres de conduites sont fournis en rouleaux.

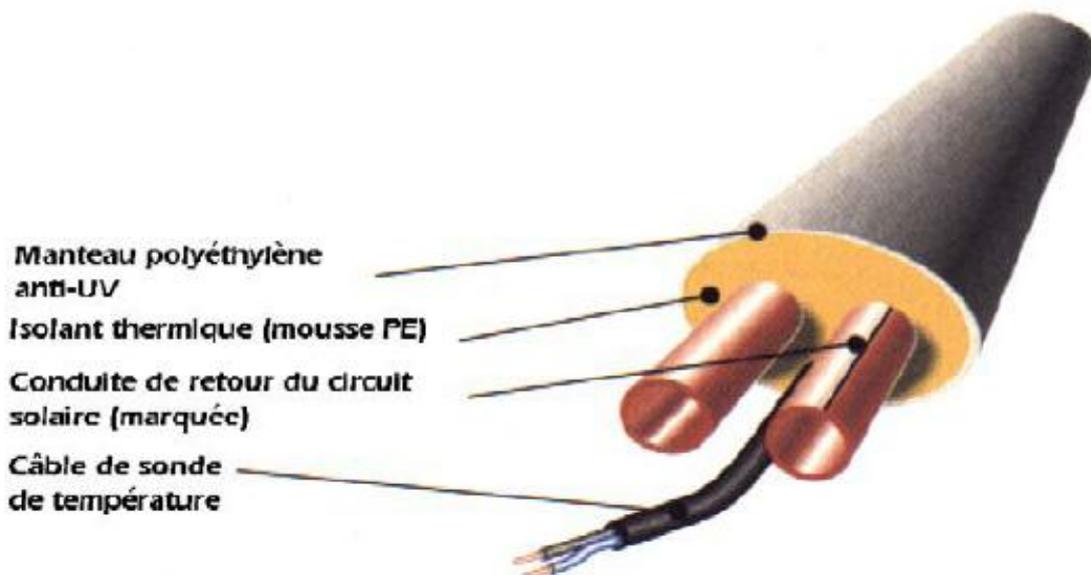


Figure III.8 : Conduite préfabriquée de type « Twin tubes »

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. D'autre part, l'addition de propylène glycol augmente sensiblement la corrosivité de l'eau, ce qui rend également nécessaire l'adjonction au mélange eau-glycol d'inhibiteurs de corrosion. Ces mélanges font l'objet d'un dosage précis. Il est donc préférable d'avoir recours aux fluides solaires « prêts à l'emploi » commercialisés par les producteurs spécialisés ou les fabricants de chauffe-eau solaires.

L'adjonction de glycol à l'eau entraîne d'autres inconvénients :

- diminution de la capacité calorifique du fluide caloporteur,
- réduction de sa conductivité thermique,
- augmentation de sa viscosité, et
- diminution de l'étanchéité de certains joints.

Il est à noter également que les fluides solaires doivent être biodégradables et non toxiques, étant donné le risque de contact avec l'eau de distribution en cas de dégât à l'installation.

Circulateur :

Dans les installations solaires, l'usage de la pompe de circulation doit être minimisé afin de maintenir une différence de température maximale entre les capteurs solaires et la partie inférieure du ballon de stockage. Il s'agit donc d'éviter tout surdimensionnement.

La puissance du circulateur est calculée de manière classique, en fonction pertes de charge du circuit primaire et de la pression hydrostatique éventuelle, comme pour les installations de chauffage central.

Les modèles de circulateurs courants proposés sur le marché ont 3, voire 4 vitesses permettant un réglage facile. Idéalement, sous fort ensoleillement, la vitesse maximale de la pompe sera réglée de manière à ce qu'il se produise une différence de température de l'ordre de 8 à 12°C entre la conduite de départ des capteurs et la conduite de retour.

Les circulateurs de chauffage sont normalement conçus pour fonctionner à grands débits avec des hauteurs de charge limitées. Ils présentent des rendements de 1 à 7% dans beaucoup de cas, dont celui des installations solaires, qui présentent des débits plus faibles et des hauteurs de charge plus importantes. Pour cette raison, un certain nombre de firmes ont développé des pompes de circulation optimisées qui présentent des consommations d'énergie réduites de moitié, et donc des rendements électriques doublés.



Figure III.9 : Circulateur optimisé pour les installations solaires

Echangeur de chaleur :

Le transfert de la chaleur du fluide caloporteur à l'eau chaude contenue dans le ballon de stockage nécessite un échangeur de chaleur. On distingue 2 types d'échangeurs : les échangeurs internes et externes.

Echangeur interne :

Les échangeurs de chaleur internes prennent la forme de tuyauterie en spirale (Figure B-36) dont la surface est soit lisse, soit cannelée. Chacun de ces types de surface présente des avantages :

- les surfaces lisses présentent une plus grande capacité d'échange par unité de surface d'échange et ils sont moins sensibles à l'entartrage,
- les surfaces cannelées nécessitent moins de longueur d'échangeur pour une même surface d'échange.

L'accumulation de tartre sur les parois des échangeurs affecte très fortement leur rendement : une couche de 2 mm tartre réduit le facteur d'échange de 20% ; une couche de 5 mm, de 40 %.

Les nouveaux échangeurs de chaleur présentent des parois lisses et cherchent à maximiser la stratification au sein des réservoirs de stockage. La circulation s'y réalise de haut en bas, à contre-courant, pour optimiser le transfert de chaleur.

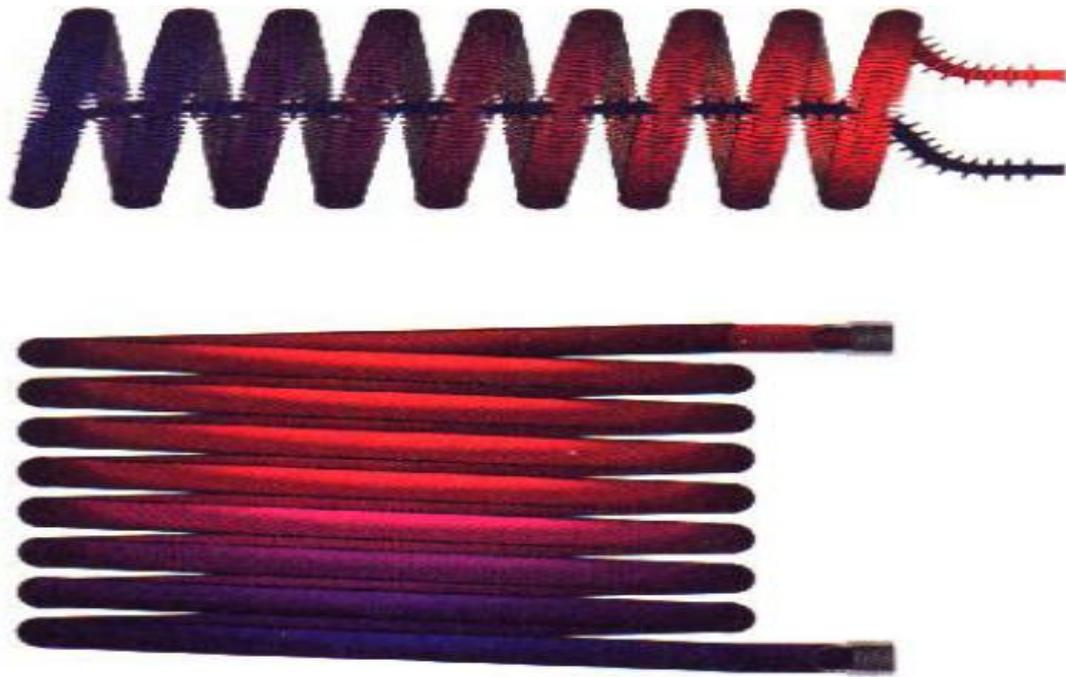


Figure III.10 : Echangeurs de chaleur

Echangeur externe :

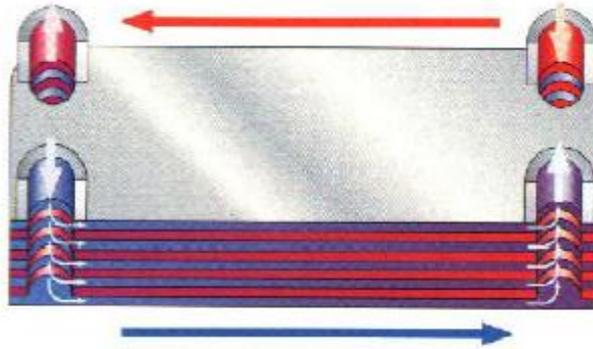
Les échangeurs externes sont dans la plupart des cas des échangeurs à plaques fonctionnant à contre-courant. Des échangeurs à tubes parallèles sont également utilisés pour un nombre réduit d'applications. Les échangeurs externes doivent nécessairement être munis d'une isolation thermique adéquate.

Avantages des échangeurs externes :

- meilleur coefficient de transmission thermique que les échangeurs internes,
- peu de pertes de rendement par entartrage,
- possibilité de raccorder plusieurs ballons à un seul échangeur,
- possibilité de chauffer la partie la plus basse du ballon (non chauffable par les échangeurs internes situés légèrement plus haut).

Inconvénients :

- plus chers que les échangeurs internes,
- nécessité d'une pompe supplémentaire pour le circuit secondaire (entre l'échangeur et le ballon de stockage).



Les échangeurs externes (comptant au moins 30 m de capteurs) ou ils peuvent être raccordés à plusieurs ballons de stockage. Il n'y a dans ce cas aucun surcoût par rapport aux échangeurs internes.

Figure III.11 : Echangeur de chaleur externe

Clapet anti-retour :

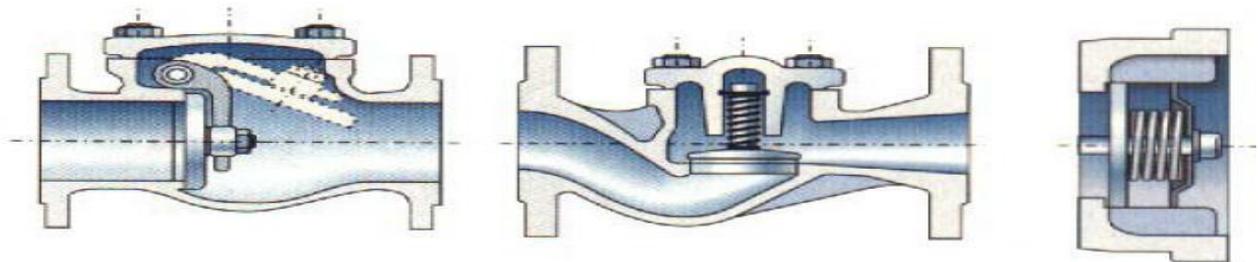


Figure III.12: Modèles de clapets anti-retour

Dans les chauffe-eau solaires à l'arrêt, un courant parasite de convection naturelle, appelé « thermosiphon inverse » peut s'installer. Ce courant fait « tourner » le chauffe-eau solaire à l'envers : la chaleur du ballon de stockage est progressivement évacuée vers les capteurs. Pour éviter cela, un clapet anti-retour est placé sur la conduite de retour entre le circulateur et les capteurs solaires. Selon le même principe, des mouvements ascendants peuvent également s'installer au sein d'un seul tuyau (à partir de diamètres 15 mm). On place donc également un clapet anti-retour sur la conduite de départ depuis les capteurs. Les clapets utilisés sont des modèles à ressort, utilisables dans toutes les positions de montage, au contraire des modèles à clapet mobile. Les pertes de charge engendrées par les clapets doivent être les plus faibles possibles.

Purgeur :

Le purgeur a pour fonction d'éliminer les bulles d'air emprisonnées au sein du circuit primaire. Ce dispositif est placé au point le plus élevé du circuit solaire, à proximité

immédiate des capteurs. Il s'agit généralement d'un purgeur automatique équipé d'un récipient de collecte fermé. Ce récipient doit être fermé pour écarter tout risque de brûlure en cas d'ouverture intempestive du dispositif (ex. : cas de surchauffe d'une installation mise à l'arrêt par grand ensoleillement). Pour améliorer leur efficacité, les purgeurs sont souvent montés sur un séparateur d'air figure III.13 Ces dispositifs permettent sous certaines conditions de placer le purgeur en partie basse de l'installation à proximité du ballon de stockage.

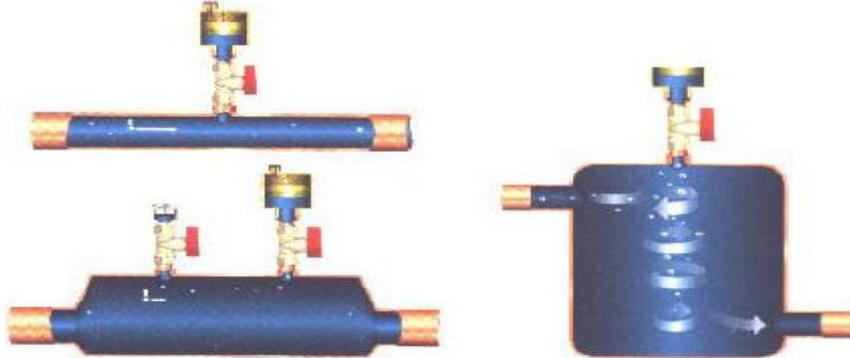


Figure III.13: Importance du bon placement d'un purgeur

En haut à gauche : mauvais dégazage

En bas à gauche : bon dégazage

En bas à droite : bon à très bon dégazage

Les installations solaires doivent être purgées lors du remplissage, et au besoin ultérieurement en cours de fonctionnement. Il est à noter que les circuits primaires à vidange fonctionnant avec une présence d'air partielle dans le circuit primaire, ne nécessitent pas de dispositif de purge.

Le purgeur doit présenter une résistance :

- chimique aux mélanges à base de glycol,
- thermique aux températures de 150°C au minimum.

Débitmètre à vis de réglage :

Le débitmètre à vis de réglage est un petit dispositif mécanique de mesure du débit permettant un réglage approximatif du volume pompé. On trouve essentiellement ce dispositif dans les stations solaires intégrées.

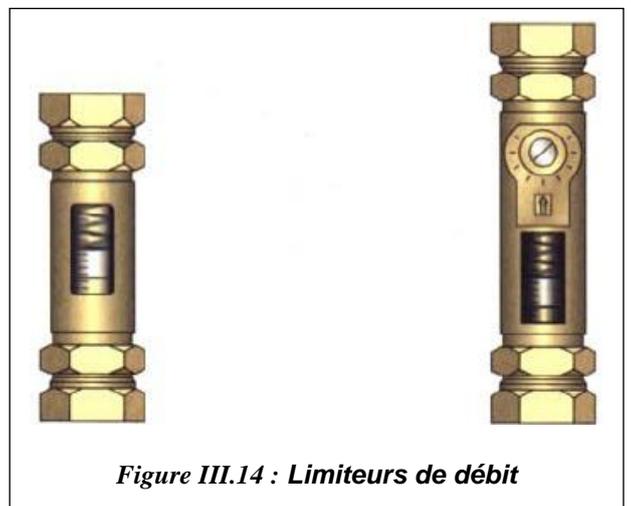


Figure III.14 : Limiteurs de débit

Organes de sécurité du circuit solaire :

Tout comme les installations de chauffage central, le circuit primaire solaire doit être automatiquement protégé des conséquences de toute surchauffe et/ou surpression, même et surtout lorsque l'installation solaire est à l'arrêt. En cas d'ensoleillement très fort, l'installation peut être mise à l'arrêt automatiquement afin d'éviter toute surchauffe dans le ballon de stockage. La température s'élève alors dans les capteurs où le fluide caloporteur stagne et s'évapore induisant une surpression dans le circuit primaire. Le purgeur automatique permet d'évacuer une partie de cette surpression mais ne protège pas suffisamment l'installation qui doit être munie d'une soupape de sécurité.

Soupape de sécurité :

La soupape de sécurité (Figure III.15) permet d'évacuer toute surpression dans l'installation en cas d'erreur de manipulation ou de surchauffe dans les capteurs. La pression d'ouverture de la soupape est choisie de manière à protéger le composant le plus faible de l'installation. Un bac de récolte est placé à la sortie de la soupape de manière à récupérer le liquide expulsé en cas de surpression.

Le volume de ce bac équivaut au minimum au contenu des capteurs solaires. Par mesure de précaution, il est dans certains cas utile de le dimensionner de manière à pouvoir récolter la totalité du fluide caloporteur de l'installation.

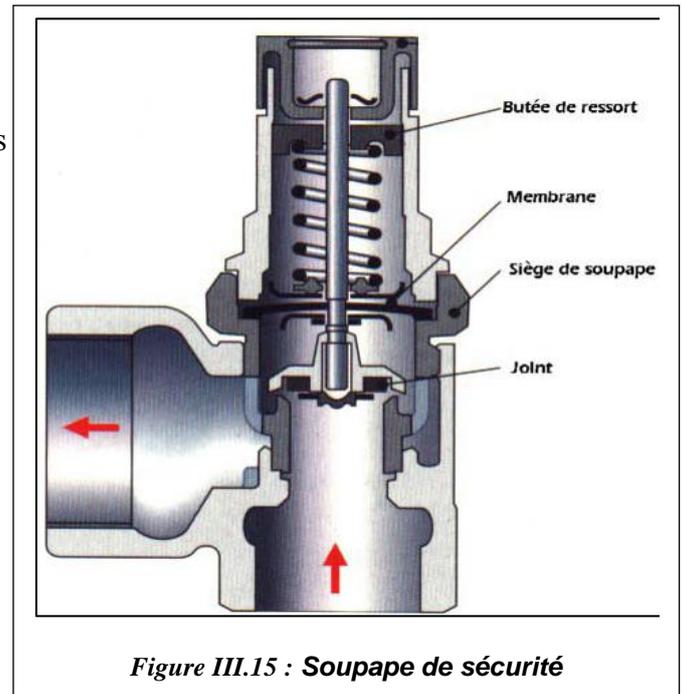


Figure III.15 : Soupape de sécurité

Vase d'expansion à membrane :

Le vase d'expansion est un récipient métallique fermé muni d'une membrane à mi-hauteur (figure III.16). La moitié inférieure du vase est remplie d'azote. Lorsque le circuit hydraulique est vide, la pression d'azote comprime la membrane contre les parois supérieures du vase. Une fois l'installation remplie de fluide caloporteur (à froid), le liquide exerce une pression sur la membrane et remplit partiellement le vase. Lorsque l'installation s'échauffe, le volume du fluide augmente, la pression augmente sur la membrane et le liquide pénètre un peu plus dans le vase.

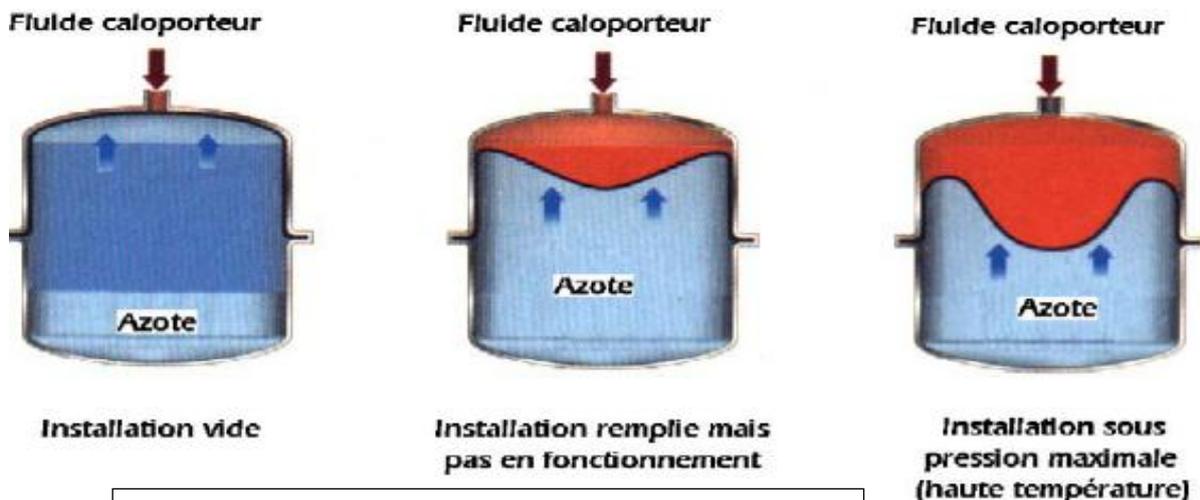


Figure III.16: Fonctionnement d'un vase d'expansion

Tous les vases d'expansion proposés pour les installations de chauffage central ne conviennent pas à une utilisation solaire. L'adéquation de la membrane au régime de pression et sa résistance (chimique) au contact avec le fluide caloporteur doivent être vérifiées.

Le vase d'expansion est placé sur la conduite de retour vers les capteurs (protection contre les hautes températures), et en amont de la pompe (côté aspiration – protection contre les surpressions additionnelles dues à la pompe). Pour un maximum de sécurité, le vase

d'expansion est dimensionné de manière à pouvoir reprendre la totalité du volume de liquide contenu dans les capteurs. De cette façon même en cas d'évaporation complète du fluide caloporteur dans les capteurs (état de stagnation sous fort ensoleillement), l'installation sera protégée et la soupape de sécurité n'entrera pas en fonction.

Station solaire :

La plupart des installations solaires standard compte une station solaire pré-montée comportant les éléments suivants :

Sur la conduite de retour vers les capteurs
 1 Robinet de fermeture, 2 Connexion de remplissage, 3 Circulateur, 4 Clapet anti retour, 5 Thermomètre, 6 Manomètre, 7 Conduite renforcée, 8 Attache murale,

9 Soupape de sécurité, 10 Limiteur de débit, 11 Vase d'expansion.

Sur la conduite de départ des capteurs
 12 Anneau de serrage, 13 Robinet de fermeture, 14 Thermomètre, 15 Conduite avec clapet anti-retour. Ces éléments sont intégrés dans un boîtier mural isolé thermiquement. Les stations solaires rendent le montage plus rapide et plus fiable.

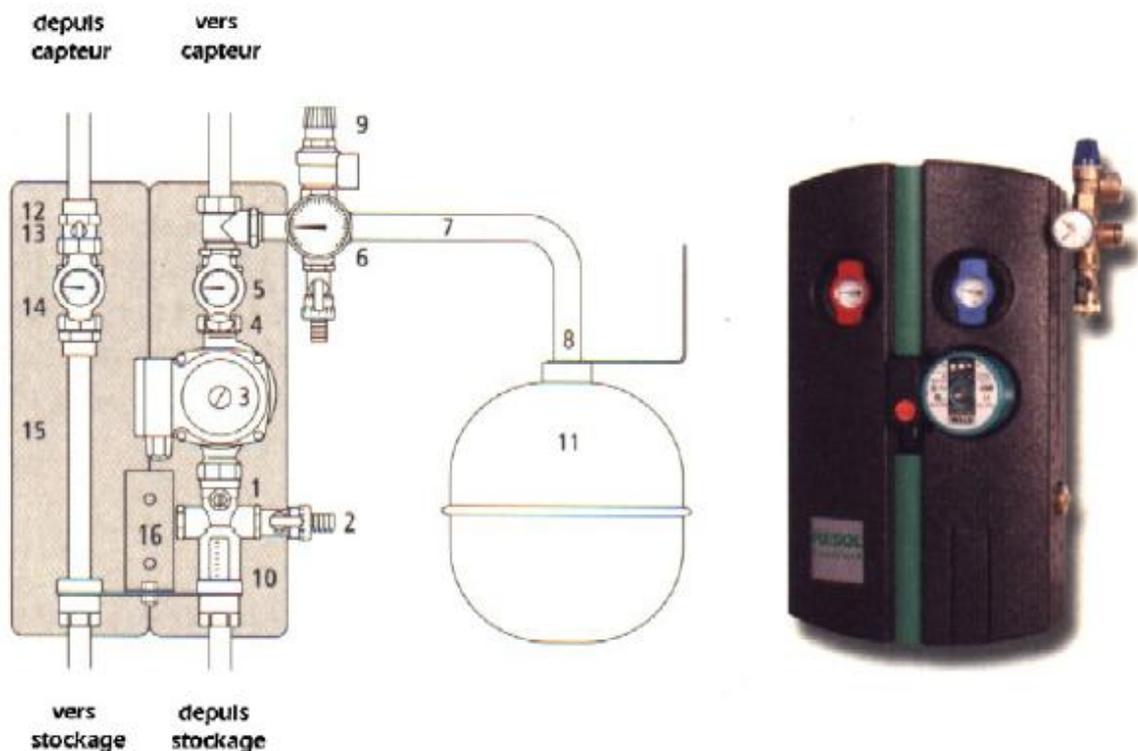


Figure III.17 : Station solaire

Dimensionnement des composants du circuit :

Dimensionnement des canalisations :

Les canalisations sont dimensionnées des paramètres suivant :

- Débit de fluide
- Perte de charge

- Consommation électrique minimale des auxiliaires (si on diminue le diamètre des tuyauteries, les pertes de charge augmente, ce qui entraîne une augmentation de la hauteur manométrique des pompes et donc une augmentation de consommation électrique.

Calcul manuel par la formule approchée [13]:

$$D_i = 33.3 \times \left(\frac{Q}{(\rho \cdot \pi)} \right)^{0.5} \quad (III. 18)$$

D_i : diamètre intérieur.

Q : débit nominal.

D_i : diamètre intérieur.

ρ : masse volumique de fluide (Kg/m^3).

Critère de sélection des tuyauteries :

- Eviter le surdimensionnement des canalisations (cause de surcout et de pertes thermique inutiles).
- Les matériaux employés et les accessoire (joints, raccord...)
- Doivent pouvoir résister au régime de température des circuits solaires (110 °C au minimum).
- Une attention particulière est apportée au choix des matériaux afin d'éviter les désordres électrolytiques (effet de pile).

L'ensemble des tuyauteries véhiculant l'eau chaude ainsi que les coudes, tés, brides, corps de vannes, nourrices, etc. sont calorifugés, en intégrant une résistance aux hautes température possible (pointes 140 °C et 110°C en continu) sur une circuit solaire

Dimensionnement des vannes et robinet :

Les vannes sont dimensionnées, en fonction :

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

Critère de sélection des vannes :

Absence de risque de corrosion par conception.

Fiabilité.

Pour les organes d'équilibre :

- Le dimensionnement doit donner aux organes une bonne autorité afin que l'équilibrage soit aisé à réaliser.
 - Il faut préférer les marques offrant un service pour être certain que cette opération sera correctement effectuée (particulièrement l'équilibrage du champ de capteur)
- La mise en œuvre de robinetterie doit être en respectant principes suivants :
- Isolement possible de chaque appareil risquant d'être démonté.
 - Vidange possible de toute portion du circuit isolable.
 - Vanne de vidange facilement accessible à chaque point bas.
 - Robinet de réglage sur chaque portion de réseau devant équipé.

Dimensionnement des accessoires de sécurité :

Vase d'expansion :

Les méthodes applicables à la protection des installations solaires, elles concernent essentiellement les vases fermés. La tuyauterie d'expansion doit permettre l'écoulement du débit de fluide caloporteur correspondant à la dilatation la plus rapide, avec une vitesse inférieure à 0,1 m/s. Le diamètre nominal d (mm) de la tuyauterie d'expansion peut être calculé par la formule approchée :

$$d = 120 * \left(a * \frac{P}{\rho * c_p} \right) \quad (\text{III. 19})$$

Avec :

P : puissance maximale du champ de capteur (kW),

C_p : capacité calorifique du fluide caloporteur (J/kg),

a : coefficient de dilatation volumique moyen du fluide caloporteur entre 0 °C et 110 °C,

ρ : masse volumique du fluide caloporteur à la température de 110 °C et à la pression correspondante.

La capacité utile du vase d'expansion doit être au moins égale au volume correspondant à la dilatation du fluide caloporteur du circuit primaire entre 0 °C et 110 °C. (Soit environ 10 % du volume du circuit primaire) Pour les vases fermés s, cette condition doit être réalisée en respectant la pression maximale d'utilisation, en tous points de l'installation. Lorsque le vase d'expansion comporte une membrane, celle-ci doit être compatible avec le liquide caloporteur. Aucune vanne ne doit être installée sur les éléments de tuyauteries situés entre le vase d'expansion et le circuit primaire L'expansion du liquide caloporteur dans l'installation doit être compensé par le vase. Le volume V du vase doit être légèrement plus grand que le volume d'expansion du liquide. Il est déterminé à partir du volume total de l'installation par la relation :

$$V = V_c * \frac{K_d}{h} \quad (III. 20)$$

Dans laquelle :

- V_c : est le volume total du fluide caloporteur (l),
- K_d : est le coefficient de dilatation à la température maximale d'utilisation (température de stagnation des capteurs) (%).
- h : est l'effet utile du vase $h = \frac{p_2 - p_1}{p_1}$

Avec

P_2 : pression absolue d'ouverture des soupapes du vase et P_1 : pression absolue de gonflage du vase.

Purgeurs :

Chaque point haut du circuit primaire doit être équipé de purgeurs (purgeurs automatiques ou bouteilles de purge). Un soin particulier doit être apporté aux purges des points hauts en chaufferie. Avec des purgeurs automatiques, les pompes devront être installées de manière à maintenir l'ensemble du circuit à purger en surpression.

Soupapes :

Les soupapes de sécurité doivent être conformes à la norme NFP 52-001 et être tarées à une pression inférieure à la pression maximale de service de l'installation. Elles seront placées directement sur le collecteur de sortie des capteurs, sans organe d'obstruction entre les capteurs et la soupape. S'il n'existe pas d'autre protection contre les surchauffes, et pour éviter toute surpression dans une installation fermée, la soupape de sécurité devra être choisie de telle manière qu'elle puisse évacuer un débit de vapeur correspondant à la pression maximum reçue par les capteurs, sans que la surpression effective par rapport à la pression nominale de service dans les absorbeurs puisse dépasser 0,5 bar. Le diamètre intérieur minimal du tube de sécurité peut être calculé en fonction de la puissance maximale P reçue par le champ de capteurs, par la relation :

$$d(mm) = 15 + 1.4 * P \quad (III. 21)$$

Avec : $d > 26$ mm et P en kW.

Perte de charge

Le calcul des pertes de charge dans une conduite permet de faire le choix de la pompe de circulation. Elle dépend essentiellement de la nature de l'écoulement et de l'état de surface interne de la conduite. Pour connaître la nature d'un écoulement, on fait recours au nombre de Reynolds, qui est définit comme étant le rapport des forces inertielles à des forces de viscosité

$$R_e = \frac{\rho \times U_m \times D}{\mu} \quad (III.22)$$

L'expression donnant les pertes de charge dans une conduite de longueur L est :

$$\Delta p = 2f \times \frac{\rho \times (U_m)^2}{D} L \quad (\text{III. 23})$$

Avec

D : le diamètre intérieur de la conduite.

ρ : la masse volumique de fluide.

μ : la viscosité dynamique du fluide.

f : est le coefficient de frottement.

U_m : est la vitesse moyenne du fluide permettant le calcul du débit massique

$$\dot{m} = \rho \times U_m \times \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (\text{III. 24})$$

Le débit est calculé à partir de la puissance qui doit être distribuée.

$$P = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad (\text{III. 25})$$

ΔT est la différence entre la température d'arrivée de l'eau chez le client et la température l'eau au retour.

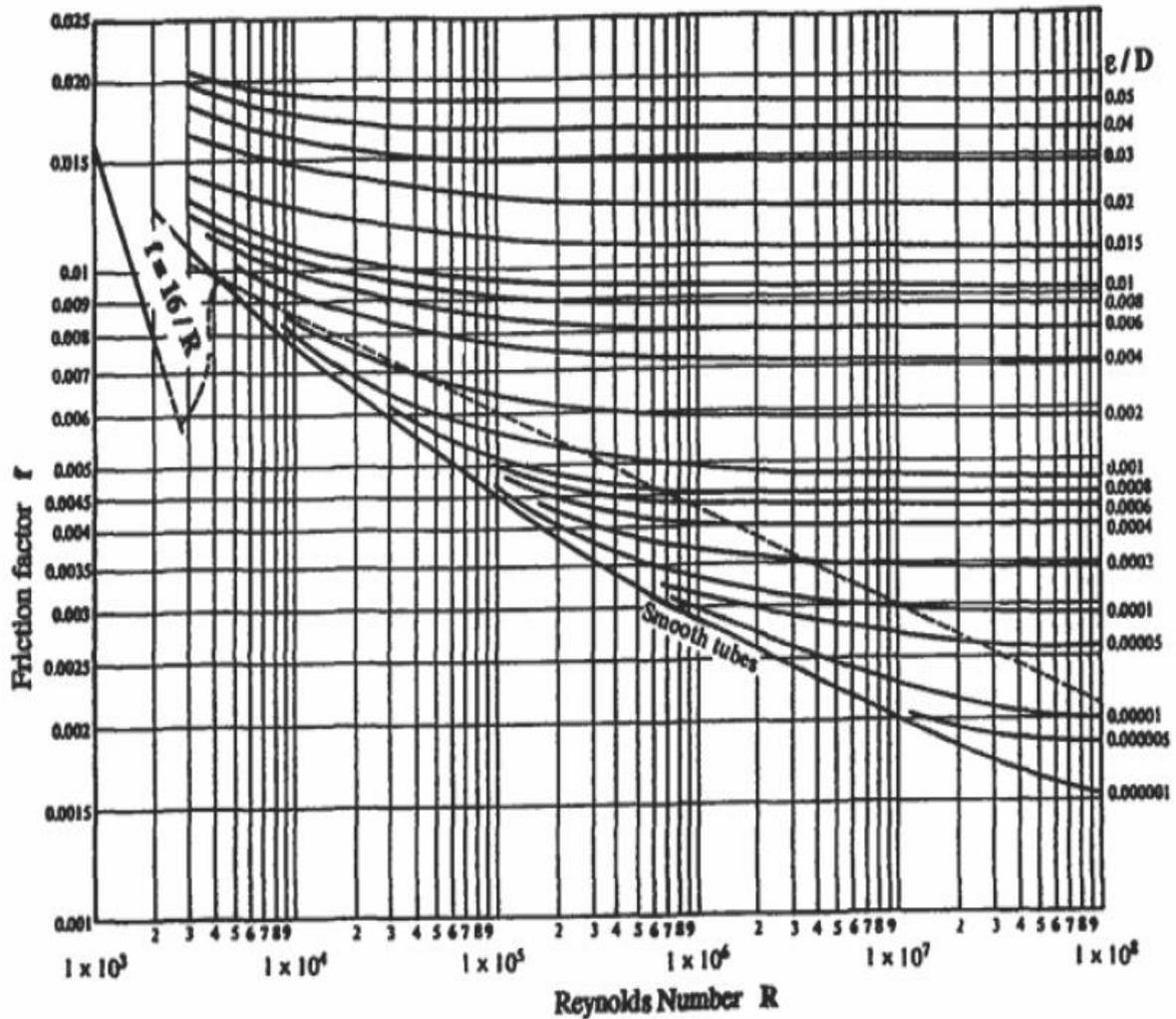


Figure III.18 : diagramme de Moody

CHAPITRE IV: DETAIL DE CALCUL ET ANALYSE DES RESULTATS

Introduction:

Toute étude ou application de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et détaillée du rayonnement solaire dans ce site. Ce chapitre vise à dimensionner l'installation de production d'eau chaude sanitaire (ECS) dans un collectif de 16 logements, répartie par 4 étages, et occupées par 96 habitants. L'installation se situe dans la région d'Alger dont les données géographiques suivantes :

| vile | Latitude(°) | Longitude(°) | Altitude(m) | Albédo |
|-------|-------------|--------------|-------------|--------|
| Alger | 36.8 N | 3.1 E | 60 | 0.20 |

Tableau IV.1 : quelques données géographiques d'Alger

Calcul des rayonnements solaires global G :

Rayonnement direct et rayonnement diffus sur un plan horizontal :

En premier lieu, il convient de calculer la moyenne mensuelle du rayonnement solaire diffus quotidien G_{dh} à partir de la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global quotidien G_h en utilisant la corrélation Orgill et Hollands (III.7) [21] :

$$\frac{G_{dh}}{G_h} = \begin{cases} 1.0 - 0.249 * Kt & \text{si } Kt < 0.35 \\ 1.557 - 1.84 * Kt & \text{si } 0.35 < Kt < 0.75 \\ 0.177 & \text{si } Kt > 0.75 \end{cases}$$

$$G_h = G_{bh} + G_{dh}$$

Calcul de l'indice de clarté K_t :

L'indice de clarté calculé à partir de la formule suivante :

$$K_t = \frac{G_h}{G_{ext,h}}$$

G_h : rayonnement quotidien horizontale.

$G_{ext,h}$: rayonnement extraterrestre.

Ou les valeurs mensuelles de G_h sont obtenues à partir des données climatiques d'Alger [17], et les valeurs mensuelles $G_{h,ext}$ sont calculées à partir de relation (III.5).

| Mois | Rayonnement quotidien horizontal G_h MJ/m ² | Rayonnement extraterrestre(MJ/m ²) | K_t |
|-------|--|--|-------|
| Janv | 7.92 | 17.22 | 0.46 |
| Fevr | 10.8 | 22.09 | 0.489 |
| Mars | 14.76 | 28.81 | 0.512 |
| Avr | 17.64 | 35.37 | 0.499 |
| Mai | 21.6 | 39.89 | 0.541 |
| Juin | 22.32 | 41.57 | 0.537 |
| Juill | 25.2 | 40.6 | 0.621 |
| Aout | 23.04 | 36.98 | 0.623 |
| Sépt | 18.36 | 31.02 | 0.592 |
| Oct | 11.88 | 24.06 | 0.494 |
| Nov | 9.72 | 18.26 | 0.532 |
| Déc | 7.2 | 15.68 | 0.459 |

Tableau IV.2 : Rayonnements solaire quotidien horizontal et extraterrestre mensuel

La corrélation Orgill et Hollands et la relation (III.7) donne les résultats suivantes :

| Mois | Gdh/Gh (MJ/m ²) | Gdh (MJ/m ²) | Gbh (MJ/m ²) |
|-------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Jan | 0.711 | 5.631 | 2.289 |
| Fev | 0.657 | 7.096 | 3.704 |
| Mars | 0.615 | 9.077 | 5.683 |
| Avr | 0.639 | 11.272 | 6.368 |
| Mai | 0.561 | 11.96 | 9.64 |
| Juin | 0.569 | 12.7 | 9.66 |
| Juill | 0.414 | 10.433 | 14.767 |
| Aout | 0.411 | 9.469 | 13.571 |
| Sep | 0.468 | 8.592 | 9.768 |
| Oct | 0.648 | 7.698 | 4.182 |
| Nov | 0.578 | 5.618 | 4.102 |
| Déc | 0.712 | 5.126 | 2.074 |

Tableau IV.3 : Rayonnement direct et rayonnement diffus sur un plan horizontal

Le rapport R_b : R_b représente le rapport du rayonnement direct sur une surface inclinée à celui sur une surface horizontale. Il est donné par l'expression (III.9), et la relation (III.16) donne le rayonnement global G les résultats sont dans le tableau suivant :

| mois | Jna | Fev | mar | Avr | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| R_b | 2,04 | 1,66 | 1,32 | 1,03 | 0,85 | 0,76 | 0,79 | 0,95 | 1,19 | 1,54 | 1,93 | 2,16 |
| G (MJ/m ²) | 9,896 | 12,751 | 15,966 | 17,060 | 19,350 | 19,220 | 21,648 | 21,880 | 19,720 | 13,610 | 13,170 | 9,237 |

Tableau IV.4 : les valeurs mensuelles de rayonnement global reçu

Consommation d'eau chaude

La consommation d'eau chaude est un élément essentiel de la détermination du chauffe-eau solaire. Elle doit être connue avec le plus précision possible.

| Bâtiment | | Consommation d'eau chaude l/jour valeur moyenne | | |
|----------------------|-----------------|---|----------------------|--------------------|
| | | Basse consommation | Moyenne consommation | Haute consommation |
| Immeuble résidentiel | Logement simple | 30 | 35 | 45 |

Tableau IV.5 : consommation d'eau chaude dans un logement simple

La moyenne consommation d'eau chaude pour un logement simple $V_j=35l/\text{jour}/\text{personne}$ à 55°C Alors, la consommation totale pour 96 personnes $V_t=3\ 360\ l/\text{jour}$.

Estimation de la température d'eau froide « T_f »:

Les températures d'eau froide sont importantes dans la détermination des besoins énergétique liés à la production d'eau chaude sanitaire. Elles peuvent varier d'une station à l'autre et en fonction des saisons.

Bien que elle est facilement mesurable mais ces informations ne sont pas toujours disponibles et il est pratique d'utilise une méthode empirique qui donne des résultats acceptables.

La température d'eau froide « T_f » d'un mois considéré est égale à la moyenne entre la température ambiante moyenne T_a du mois et la température moyenne annuelle :

$$T_f = \frac{T_{a,mensuelle} + T_{a,annuelle}}{2}$$

(IV.1)

Avec : T_{a, annuelle} = 18.2 °C

| mois | Jna | Fev | mar | Avr | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|---------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| T _a (°C) | 12,2 | 12,6 | 13,6 | 16 | 18,5 | 22,1 | 24,3 | 25,2 | 23,2 | 20 | 16,7 | 13,9 |
| T _f (°C) | 15,2 | 15,4 | 15,9 | 17,1 | 18,35 | 20,15 | 21,5 | 21,7 | 20,7 | 19,1 | 17,45 | 16,05 |

Tableau IV.6 : les températures mensuelles d'eau froid

Calculs des besoins bruts mensuels :

Le calcul des besoins bruts mensuels s'effectue de la façon suivante :

$$Q_w = a \times Nu \times (55 - T_f) \times cp_{eau} \times \frac{Nb}{7}$$

(IV.2)

a : besoins unitaires exprimés en litres d'eau à 55°C.

Nu : surface habitable totale du bâtiment (m²).

Nb_{jour-mois} = nombre de jours par mois.

T_f: température de l'eau froide entrant dans le système de préparation d'eau chaude (°C) ;

$C_{p_{\text{eau}}}$: capacité calorifique massique de l'eau égale à 1,163 Wh/(kg.K).

| mois | Jna | Fev | mar | Avr | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_f(^{\circ}\text{C})$ | 15,2 | 15,4 | 15,9 | 17,1 | 18,35 | 20,15 | 21,5 | 21,7 | 20,7 | 19,1 | 17,45 | 16,05 |
| Q_w (MWh) | 9,183 | 8,569 | 8,883 | 8,463 | 8,456 | 7,782 | 7,730 | 7,684 | 7,659 | 8,283 | 8,385 | 8,987 |

Tableau IV.7 : Résultats de calcul des besoins bruts

Calcul des pertes mensuelles de transmission entre le ballon solaire et l'appoint :

Dans le cas d'un appoint intégré (résistance électrique ou gaz avec échangeur tubulaire) au ballon biénergie dans chaque logement, les pertes de transmission sont considérées comme nulles. Dans le cas d'un appoint individuel séparé (chaudière gaz uniquement) dans chaque logement qui est relié au ballon solaire par une canalisation isolée, les pertes de transmission sont calculées de la façon suivante :

$$Q_{\text{dwsa}} = 0,02 \times Q_w \text{ (Wh)} \quad (\text{IV.3})$$

| mois | Besoin brute(MWh) | $Q_{\text{dwsa}}(\text{MWh})$ |
|-------|-------------------|-------------------------------|
| Janv | 9,183 | 0,184 |
| fév | 8,253 | 0,165 |
| Mar | 9,022 | 0,180 |
| Avr | 8,463 | 0,169 |
| Mai | 8,456 | 0,169 |
| Juin | 7,782 | 0,156 |
| Juitt | 7,730 | 0,155 |
| Aout | 7,684 | 0,154 |
| Sept | 7,659 | 0,153 |
| Oct | 8,283 | 0,166 |
| Nov | 8,385 | 0,167 |
| Dec | 8,987 | 0,179 |

Tableau IV.8 : pertes mensuelles de transmission entre le ballon solaire et l'appoint

Calcul des pertes de distribution mensuelles :

Le calcul des pertes de distribution mensuelles pour une production individuelle en volume chauffé en résidentiel collectif s'effectue de la façon suivante :

$$Q_{\text{d,w}} = 0,01 \times Q_w \text{ (Wh)} \quad (\text{IV.4})$$

| mois | Janv | Fev | Mar | AVR | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Q_{\text{d,w}}(\text{kWh})$ | 91,83 | 85,69 | 88,83 | 84,63 | 84,56 | 77,82 | 77,30 | 76,84 | 76,59 | 82,83 | 83,85 | 89,87 |

Tableau IV.9 : pertes de distribution mensuelles

Ballon de stockage :

Le volume du ballon de stockage est déterminé en fonction de la consommation journalière des personnes utilisant l'eau chaude. On prend une approche du volume de stockage $V = 4\,000$ l nettement supérieur à la consommation journalière d'eau chaude, afin d'avoir une meilleure autonomie les jours sans soleil ou permettre l'accumulation d'énergie lorsqu'il n'y a pas de consommation (fin de semaine, congés).

Afin d'assurer une meilleure distribution d'eau chaude sur les logements on prend 4 ballons de 1 000 l.

Calcul des pertes mensuelles de stockage solaire : Le calcul des pertes mensuelles de la partie solaire du stockage solaire s'effectue de la façon suivante :

$$Q_{gw_sol} = 20 \times Cr \times V \times Nb_{\text{jour-mois}} \quad (IV.5)$$

| mois | Jna | Fev | mar | Avr | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|------|------|-----|-----|-----|
| Q_{gw_sol} (kWh) | 375 | 336 | 375 | 360 | 375 | 360 | 375 | 375 | 360 | 375 | 360 | 375 |

Tableau IV.10 : pertes mensuelles de stockage solaire

Calcul final des besoins mensuels totaux :

Dans le cas d'un appoint séparé (gaz uniquement), le calcul des besoins mensuels totaux s'effectue de la façon suivante :

$$Q = 1,03 \times Q_w + 20 \times Cr \times V_n \times Nb_{\text{jour-mois}} \quad (\text{Wh}) \quad (IV.6)$$

$$Q_{f\text{-chart}} = Q_w + 20 \times Cr \times V_n \times Nb_{\text{jour-mois}} \quad (\text{Wh}) \quad (IV.7)$$

Surface de champ des Capteurs solaire :

La surface des capteurs A_c est le paramètre qui conditionne le coût et la production utile de l'installation. Le nombre de capteurs est calculé en fonction du volume de stockage, Sachant que plus ce volume est important on constate que les rendements chutent rapidement au-dessous de 75 l/m^2 et ne croissent pratiquement pas au-delà de 100 l/m^2 , on choisit la valeur du ratio R_a qui est défini comme étant le rapport entre la capacité de l'eau à chauffer par la surface totale de capteur, dans l'intervalle (75 l/m^2 - 100 l/m^2). Pour l'Algérie qui est un pays assez chaud, on prend une valeur intermédiaire dans nos calculs qui est $R_a = 90 \text{ l/m}^2$ [15].

On pourrait être tenté d'augmenter la surface de capteur afin de récupérer une plus grande quantité d'énergie.

D'où : $A_c = 46 \text{ m}^2$ ou 23 capteurs de 2 m^2

Choix d'un type de capteur :

Une partie du rayonnement solaire qui atteint le capteur est perdu par réflexion et absorption. Le rendement optique η_0 prend ces déperditions en compte tout comme les déperditions qui se

produisent à l'entrée de la chaleur dans le fluide solaire. Le rendement optique est le maximum de la courbe caractéristique lorsque la différence entre la température des capteurs et la température ambiante est de zéro et que les capteurs solaires ne cèdent pas de déperditions calorifiques à l'environnement.

Durant leur montée en température, les capteurs solaires cèdent de la chaleur à l'environnement par conduction, rayonnement et convection (mouvement de l'air).

| | |
|---|----------------------------|
| Fabricant | avant-Garde |
| Modèle | TEC sol SR 020 |
| surface brute par capteur solaire | 2.04m ² |
| surface de captage par capteur solaire | 1.89m ² |
| B (le facteur optique d'un capteur solaire) | 0,6 |
| K (coefficient de conduction) | 10 W/ (m ² . K) |

Tableau IV.12 : quelques données de modèle réel

Calcul de taux de recouvrement solaire « F » :

Le taux de couverture solaire indique le pourcentage annuel d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire pouvant être couvert par l'installation solaire. Plus le taux de couverture solaire est choisi élevé, plus l'on économise de l'énergie traditionnelle, on peut le calculer par la méthode de f-Chart.

Description de méthode de f-Chart :

Le rendement d'un système de production d'eau chaude sanitaire avec stockage peut être évalué grâce à la méthode de calcul du taux de recouvrement de la charge par l'énergie solaire (fraction solaire) dite méthode f-Chart [7]. Cette méthode permet de calculer, sur une base mensuelle, la quantité d'énergie fournie par un système de chauffage solaire avec stockage, en fonction des valeurs mensuelles de l'éclairement solaire incident et de la charge de chauffage L, en connaissant la température ambiante et la température de l'eau froide.

Calcul des variables X et Y

Pour calculer la fraction d'énergie solaire, Deux nombres sans dimension X et Y sont définis :

$$X = Ac \times Uc \times \eta_p \times \Delta T \times t_{mois} \times \frac{cos}{Q_{f-chart}} \quad (IV.8)$$

$$Y = Ac \times B \times \eta_p \times G_{global} \times \frac{t_{mois}}{Q_{f-chart}} \quad (IV.9)$$

Avec :

t_{mois} : le nombre d'heures par mois (heures) ;

η_p : l'efficacité de la boucle de captage. Ce coefficient est pris égal à 0,8 ;

Uc : le coefficient de déperdition thermique de la boucle de captage (W/[m².K]) ;

ΔT : l'écart de température conventionnel (K) ;
 $Q_{f-chart}$: les besoins mensuels pour l'eau chaude sanitaire (Wh) ;
 c_{os} : le coefficient correctif de stockage ;
 I_{sc} : l'ensoleillement sur le plan des capteurs solaires (W/m²) ;
 A : la superficie de capteurs solaires (m²) ;
 B : le facteur optique d'un capteur solaire.

Le calcul du taux de couverture solaire tient compte des pertes de génération du système solaire. Le calcul de F global sur l'année correspond à la moyenne pondérée des valeurs de F mensuel par les besoins $Q_{f-chart}$ considérés chaque mois. Cette valeur de F moyenne appliquée aux besoins annuels $Q_{f-chart}$ permet de calculer l'apport solaire annuel en Wh.

Fraction solaire f :

La fraction solaire f de la charge de chauffage totale mensuelle couverte par le chauffe-eau solaire est donnée en fonction de X et Y , corrigé de la manière suivante :

$$f = (1.029 \times Y) - (0.065 \times X) - (0.245 \times Y^2 + (0.0018 \times X^2) + (0.0215 \times Y^3)) \quad (IV.10)$$

Calcul du taux de recouvrement de la charge annuel :

Connaissant les besoins en chauffage L et l'apport solaire fL on peut calculer la fraction annuelle de l'énergie solaire fournie à la charge de la manière suivante [7]:

$$f = \frac{\sum f Q_{f-chart}}{\sum Q_{f-chart}} \quad (IV.11)$$

Déperditions thermiques de la boucle de captage :

Le calcul du coefficient de déperditions thermiques de la boucle de captage s'effectue de la façon suivante :

$$Uc = K + \frac{UL}{A} \quad (IV.12)$$

Avec :

K : le coefficient de transmission thermique du capteur solaire (W/[m².K]) ;
 UL : le coefficient de déperditions thermiques équivalent des tuyauteries du circuit des capteurs solaires (W/K) ;
 A : la superficie de capteurs solaires (m²).

UL est le produit de la longueur des tuyauteries par leur coefficient d'émission. Son calcul s'effectue de la façon suivante :

$$UL = U_{int} \times L_{vert} + U_{ext} \times L_{horiz} \quad (W/K) \quad (IV.13)$$

Avec :

L_{vert} : la longueur totale de canalisations verticales (L) ;

L_{horiz} : la longueur totale de canalisations horizontales (L) ;

UI_{int} : le coefficient de conductibilité thermique des canalisations intérieures (W/[K.m]) ;

UI_{ext} : le coefficient de conductibilité thermique des canalisations extérieures (W/[K.m]).

Les hypothèses suivantes sont prises en compte dans cette méthode pour le calcul des coefficients de conductibilité thermique des canalisations :

- toutes les canalisations sont en cuivre série légère (écroui ou recuit selon le diamètre et la position),
- la conductibilité thermique du calorifuge est de 0,036 W/(K.m) ;
- le diamètre unique des canalisations en cheminement en toiture est fixé par la formule suivante où D_f représente le débit de fluide unitaire dans la boucle solaire (la valeur par défaut de D_f est de 70 L/[h.m²]) :

$$D_{ext}(mm) = 22,9 \times \left(D_f \times \frac{A}{1000}\right)^{0,4} \quad (IV.14)$$

- le type des canalisations verticales intérieures fixé à :
 - pour les appartements T1 et T2 : Ø 10*12
 - pour les appartements T3, T4 et T5 : Ø 12*14

Le tableau ci-dessous permet d'obtenir une valeur moyenne de UI en fonction du type de canalisations (le calcul de UI_{int} s'effectue par l'intermédiaire d'un prorata entre les canalisations en Ø 10*12 et Ø 12*14 suivant la proportion des logements T1/T2 et T3/T4/T5 répartis aléatoirement dans le bâtiment) :

| EPAISSEUR ISOLANT (mm) | D_{ext} (mm) | Type de canalisations | UI (W/(K.m)) |
|------------------------|----------------|-----------------------|--------------|
| 32 | 54 | Φ 52*54 | 0,29 |
| 32 | 42 | Φ40*42 | 0,24 |
| 32 | 40 | Φ38*40 | 0,24 |
| 25 | 32 | Φ30*32 | 0,24 |
| 25 | 28 | Φ26*28 | 0,22 |
| 25 | 22 | Φ20*22 | 0,19 |
| 19 | 14 | Φ12*14 | 0,17 |
| 19 | 12 | Φ10*12 | 0,16 |

Tableau IV.13 : valeur moyenne de UI en fonction du type de canalisations

Ecart de température conventionnel :

Le calcul de l'écart de température conventionnel d'un capteur solaire s'effectue de la façon

suivante :

$$\Delta T = 11,6 + 1,18 \times T_f + 3,86 \times T_h - 3,32 \times T_a \text{ (K)} \quad (IV.15)$$

T_a : la température extérieure moyenne du mois (°C) ;

T_h : la température de l'eau chaude utilisée au puisage. Ce coefficient est pris égal à 40 °C ;

T_f : la température de l'eau froide entrant dans le système de préparation d'eau chaude sanitaire (°C).

| mois | Jna | Fev | mar | Avr | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta T(K)$ | 94,66 | 94,11 | 92,72 | 89,38 | 85,39 | 80,91 | 78,81 | 76,60 | 79,38 | 83,83 | 88,41 | 92,30 |

Tableau IV.14 : résultats de calcul de l'écart de températures conventionnels

Coefficient correctif de stockage du système solaire :

Dans le cas d'un stockage à eau, le calcul du coefficient correctif de stockage s'effectue de la

façon suivante :
$$C_{OS} = \left(\frac{V_{conv}}{V_s}\right)^{0,25} = 0,955 \quad (IV.16)$$

Avec :

V_s : le volume de stockage solaire (L) ;

V_{conv} : un volume conventionnel égal à 90 litres par m² de capteur solaire ;

A_c : la surface de capteurs solaires (m²).

Application de f-Chart pour le calcul de taux de recouvrement f:

La méthode de f-Chart donne le taux de recouvrement à partir des résultats précédents

| mois | X | Y | f |
|-------|------|------|------|
| Janv | 2,65 | 0,44 | 0,25 |
| Fev | 2,55 | 0,57 | 0,36 |
| Maris | 2,80 | 0,82 | 0,52 |
| Avr | 2,62 | 0,90 | 0,58 |
| Mai | 2,60 | 1,06 | 0,68 |
| juin | 2,57 | 1,10 | 0,71 |
| juitt | 2,60 | 1,31 | 0,82 |
| Aout | 2,54 | 1,32 | 0,83 |
| Sept | 2,56 | 1,15 | 0,74 |
| Oct | 2,59 | 0,76 | 0,49 |
| Nov | 2,62 | 0,70 | 0,45 |
| Dec | 2,64 | 0,47 | 0,27 |

Tableau IV.15 : résultats du calcul de taux de recouvrement mensuel f

Avec :

$$f = \frac{\sum f Q_{f-chart}}{\sum Q_{f-chart}} = 0,55$$

Consommations énergétiques du système solaire + appoint :

Le calcul des consommations mensuelles en énergie primaire du système solaire + appoint s'effectue de la façon suivante :

$$C_{app-ECS} = \frac{(Q-F \times Q_{f-chart})}{1000 \times R_{conv-ECS}} \times C_{EP-ECS} \quad (IV.17)$$

$R_{conv-ECS}$: le rendement de conversion de l'appoint. Ce coefficient est pris égal à 1 pour un appoint électrique et à 0,93 pour un appoint gaz.

C_{EP-ECS} : le coefficient de conversion en énergie primaire pour l'appoint concerné. Ce coefficient est pris égal à 1 pour l'appoint gaz et à 2,58 pour l'appoint électrique.

Les résultats représentés dans le tableau suivant :

| mois | Jna | Fev | mar | Avr | Mai | Juin | Juitt | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta T(K)$ | 94,66 | 94,11 | 92,72 | 89,38 | 85,39 | 80,91 | 78,81 | 76,60 | 79,38 | 83,83 | 88,41 | 92,30 |

Tableau IV.16 : Consommations énergétiques mensuelles du système solaire + appoint

Performance du système solaire + appoint:

Le calcul de la performance du système solaire + appoint pour la production d'eau chaude sanitaire s'effectue de la façon suivante :

$$\alpha_{ECS} = \frac{C_{ECS-EP}}{Q_{W-année}} = \frac{50.866}{100.064} = 0.538 \quad (IV.18)$$

Dispositifs d'appoint :

Dans les climats tempérés, il est presque toujours nécessaire de mettre en place un dispositif d'appoint, pour apporter l'énergie nécessaire à la satisfaction des besoins d'eau chaude, lorsque l'ensoleillement est insuffisant.

La disposition la plus courante consiste d'installer le ballon d'appoint, alimenté par une énergie conventionnelle, en série avec le chauffe-eau solaire (**Figure IV.1**). S'il existe un réseau de distribution, il est nécessaire que le retour de bouclage s'effectue sur le ballon d'appoint. En effet, si le retour de bouclage était raccorde sur le ballon solaire, il existerait un risque de voir celui-ci réchauffé par l'énergie d'appoint ce qui dégraderait les performances du système solaire.

Le dimensionnement de ballon d'appoint s'effectue par apport le mois le plus chargé (Janvier), le taux de recouvrement dans ce mois est de 0,25 ; donc le ballon d'appoint doit dimensionner pour couvrir 72% des besoins.

$$V_{\text{bal_app}} = 800 \text{ l}$$

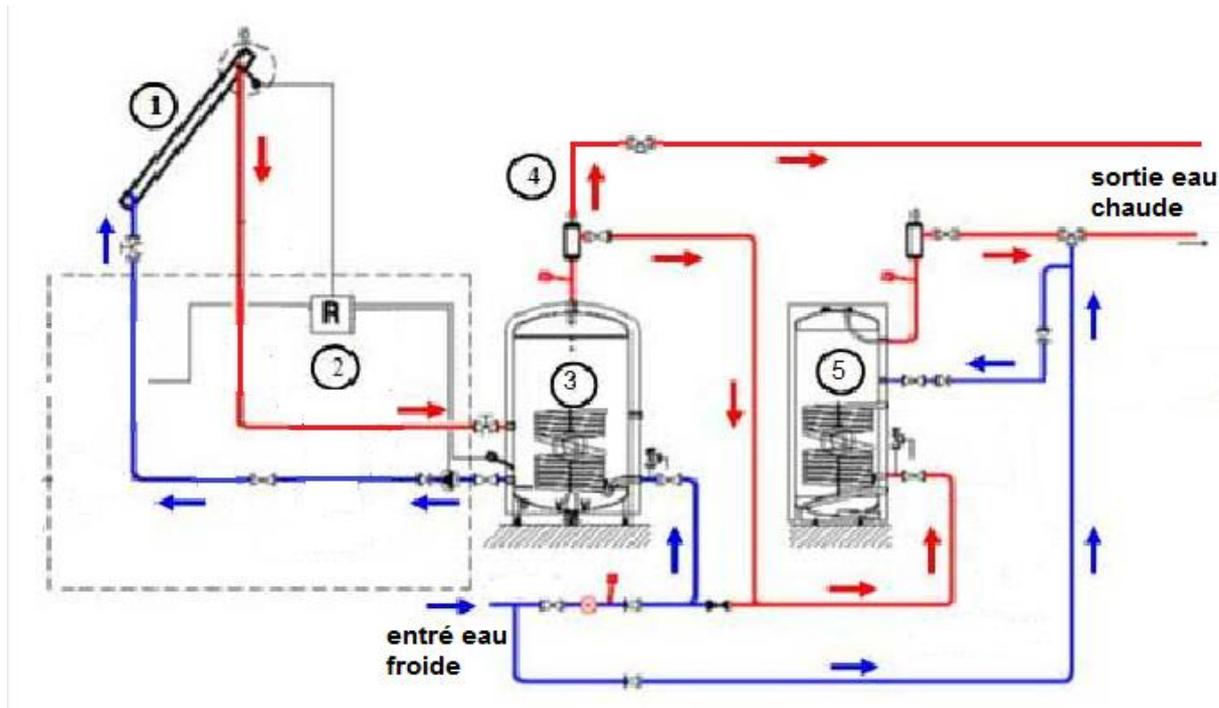


Figure IV.1 : Schéma de principe d'une installation de production d'eau chaude sanitaire avec appoint à accumulation

Principe d'une installation de production d'eau chaude sanitaire avec appoint :

Le principe consiste à récupérer l'énergie solaire grâce à un fluide caloporteur qui circule dans les capteurs (1) (Figure IV.1), le fluide caloporteur passe par les conduites (2) Par l'intermédiaire d'un échangeur thermique intégré dans les ballons solaires l'énergie est transférée (3) pour préchauffer l'eau de bâtiment. Dès qu'un soutirage est effectué, l'eau froide vient «pousser» par stratification le «front chaud» du ballon solaire collectif vers le ballon d'appoint. (4) L'énergie d'appoint vient compléter «la chauffe», si nécessaire, jusqu'à atteindre la température de consigne souhaitée, mais si la température atteint 55 C l'eau chaude va distribuer directement.

Analyse des résultats :

Calcul du rayonnement solaire :

Bien que l'intensité du rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre peut être déterminé avec précision par mesure ou par calcul, cette possibilité à la surface de la terre et à prendre avec une certaine précaution propre aux conditions météorologique locale.

La meilleure méthode pour la détermination du rayonnement solaire au niveau de la terre est par leurs mesure sur le site en question, ceci n'est généralement pas possible non seulement à cause des dépenses et du temps nécessaire mais aussi de l'existence de plusieurs composantes du rayonnement qui varient à travers le temps de même avec l'inclinaison des surfaces et leurs orientations.

Les stations météorologiques étendu à travers la surface de la terre qui enregistrent les données météorologiques incluant la durée du rayonnement solaire, température, vitesse du vent, humidité, et puisque ces stations sont opérationnel depuis plusieurs années une appréciable quantité de données est disponible et il est tout à fait naturel que les scientifiques exploitent ces données et proposent des modèles pour l'estimation du rayonnement solaire. Les applications de l'énergie solaire nécessitent la connaissance du rayonnement solaire et ces composantes sur des surfaces inclinées et orientées or dans les stations d'enregistrement généralement le rayonnement solaire globale et mesurer sur des surfaces horizontales, il parait évident qu'une corrélation entre les variations des composantes de ces radiations à travers les différentes échelle de temps doivent être non seulement proposé pour les surfaces horizontales mais ces procédure doivent être possible pour la détermination de ces valeurs pour des surfaces non horizontales.

Rayonnement quotidien horizontal et rayonnement extraterrestre :

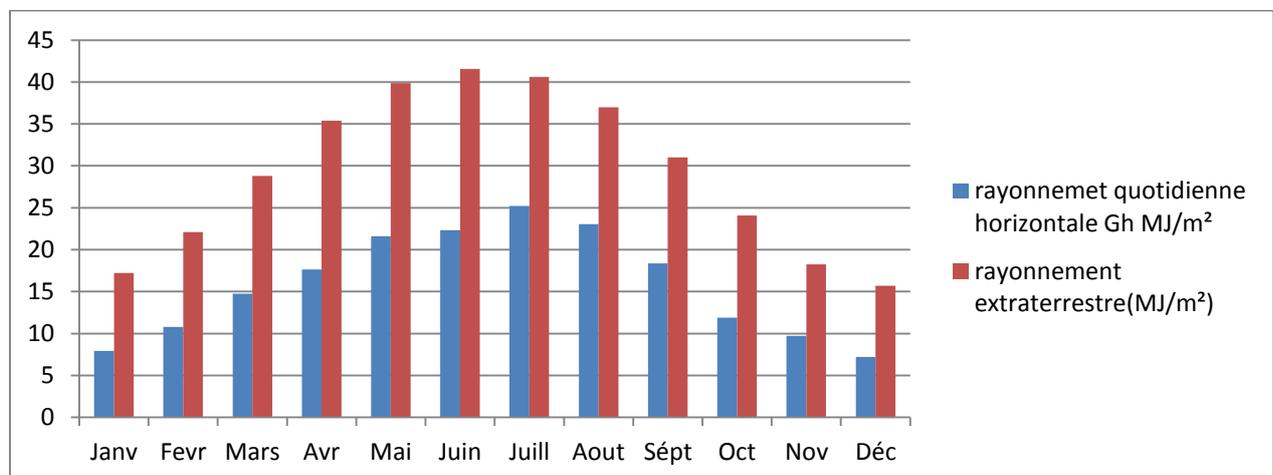


Figure IV.2 : rayonnement mensuel quotidien horizontal et extraterrestre

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la couche atmosphérique terrestre. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. On remarque que la couche atmosphérique terrestre et les aérosols, vapeur d'eau et polluant divers empêche plus d'une moitié des rayonnements solaire de l'arrive au sol.

Rayonnement global reçu G :

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus.

La Figure IV.3 représente l'évolution des irradiation solaire globale reçues durant les mois d'année, on remarque que la quantité des rayonnements attient le maximum les mois d'été (juillet et Aout), et on ne reçoit pas une grande quantité les mois d'hiver, ces résultats sont expliqué par les lois de l'astronomie (tour de la terre autour de soleil) qui génère des saison par des conditions métrologiques différentes et par le passage des nuages, en hiver surtout, qui empêche les rayonnement d'arrive au sol et par la différence de dure d'ensoleillement (long de jour) entre l'été et l'hiver.

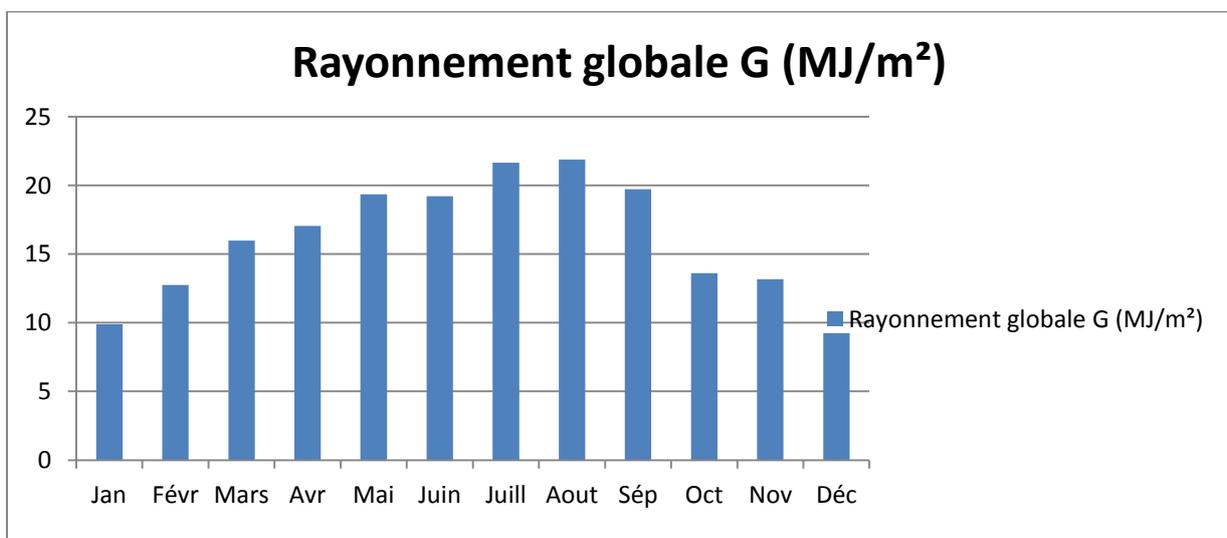


Figure IV.3 : Evolution des irradiations solaire globale reçue

Besoins bruts mensuels :

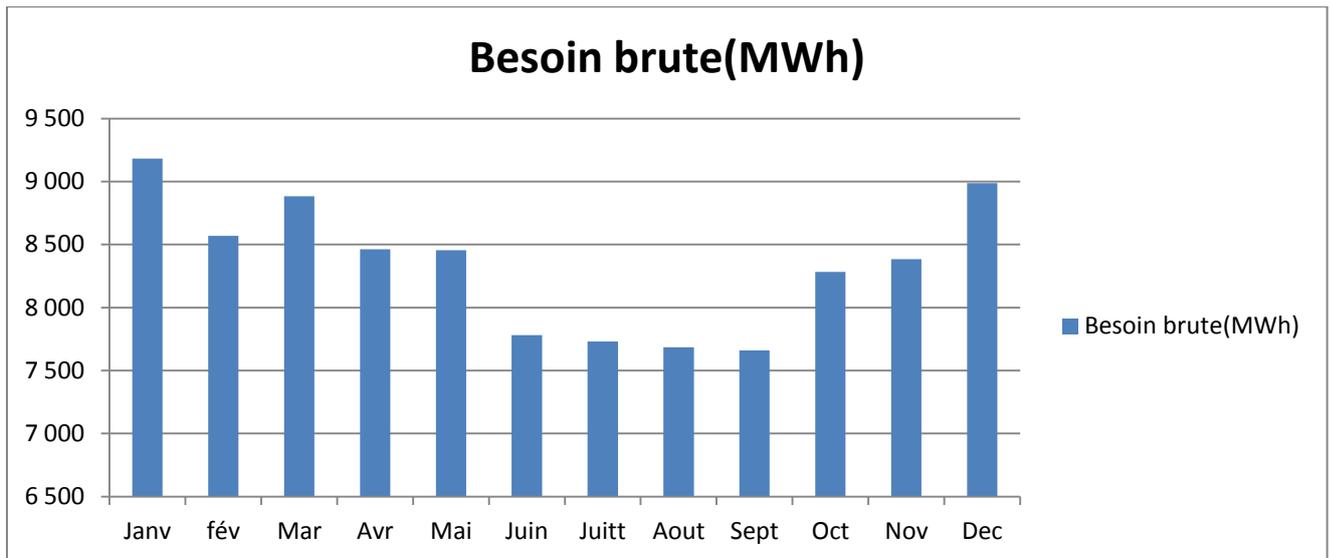


Figure IV.4 : Besoins bruts mensuels

La figure (IV.4) montre que les besoins brute des énergies pour le chauffage d'eau sont très élevés en hiver et décroît brusquement les mois d'été, à cause des conditions météorologiques, cela veut dire que on consomme plus quand 'il fait froid et vis vers ça.

Pertes mensuelles de transmission entre le ballon solaire et l'appoint :

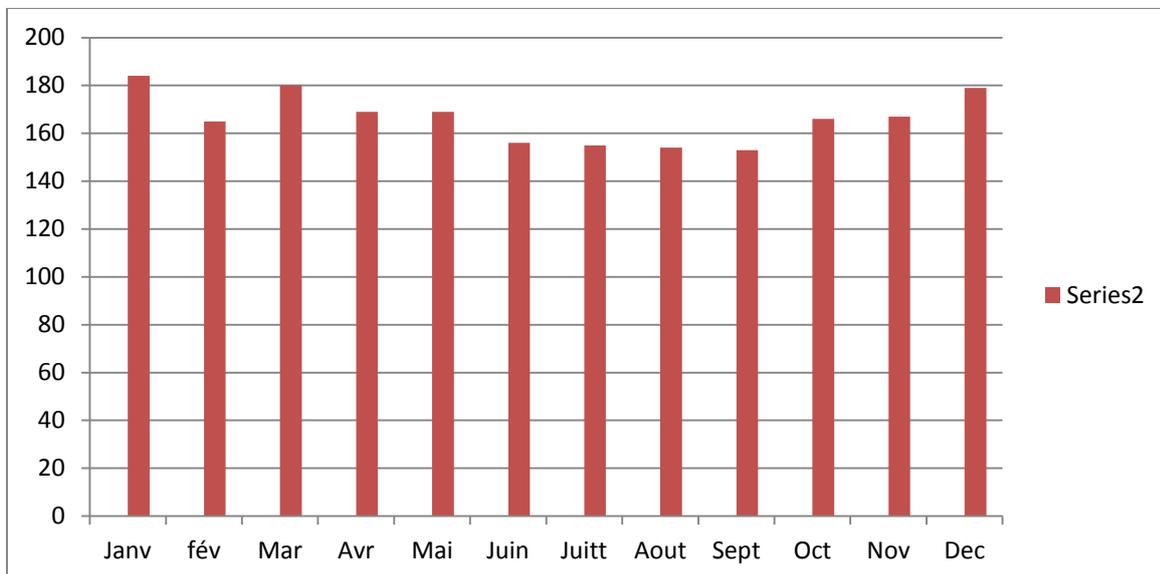


Figure IV.5 : Pertes mensuelles de transmission entre le ballon solaire et l'appoint

La figure IV.5 montre qu'il n'y a pas une grande différence des pertes de transmission entre les mois d'été et l'hiver, mais ils sont légèrement plus les mois d'hiver car les besoins brute sont plus élevés dans cette saison.

Calcul de taux de recouvrement solaire « f » :

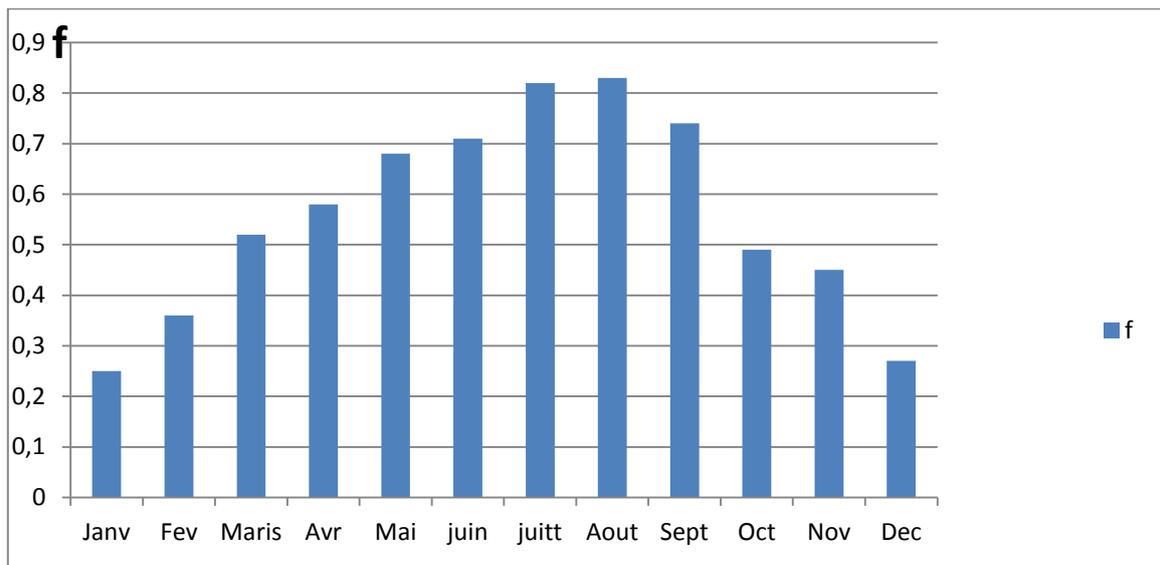


Figure IV.6 : taux de recouvrement solaire mensuel « f »

L'évolution de Le taux de recouvrement solaire « f » qui montre la figure est calculé par la méthode de f-chart, il représente le taux de recouvrement des besoins ou le pourcentage des besoins qu'on peut assurer par la partie solaire de l'installation, on remarque que l'installation assure plus de 80 % des besoins en été à cause de forte rayonnement solaire qu'on reçoit en été et la diminution des besoins d'eau chaude dans cet saison mais il n'assure plus de 30 % en hiver, l'appoint compense le manque de recouvrement des besoins durant toute l'année, il consiste d'un ballon, avec une résistance électrique ou par un échangeur de gaz, a installer en série de ballon solaire avec un système d'asservissement qui déclenche l'appoint en cas de manque en recouvrement des besoins par le système solaire.

Le taux de recouvrement annuel $f=0,55$ cela veut dire que 55% des besoins si on prend en considération les pertes (stockage, distribution) 55% présente 58,85 MWh par an satisfait par la partie solaire, ce qui est présente une économie important dans les énergies primaires.

Conclusion générale :

Les prix des énergies primaires ont tendance à augmenter actuellement, alors que l'énergie solaire est disponible en tout lieu, inépuisable, non polluante. Cependant l'énergie solaire a aussi un coût qui est celui de sa conversion.

L'Algérie est un pays très vaste dont 85% du territoire présente un ensoleillement de premier choix en terme de flux moyen annuel, toutes ces raisons font que l'énergie solaire est certainement la forme d'énergie la plus prometteuse pour l'avenir énergétique notre pays.

L'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage de l'habitat et la production d'eau chaude est désormais possible et d'actualité. Notre travail se propose à dimensionner une installation de chauffe-eau solaire collectif individualisé pour la région d'Alger, par le calcul du rayonnement global incident, et des calculs des besoins d'énergie pour le chauffage d'eau sanitaire et le dimensionnement de la surface de capteurs et le volume de stockage des ballons solaires et par la méthode de f-chart on calcule le taux de recouvrement solaire et à la fin on montre qu'on peut gagner un 55% par an d'énergie utilisée pour le chauffage d'eau sanitaire ce qui présente une importante économie en énergie primaire.

Le taux de couverture de besoin par le système solaire pourrait être augmenté à 65%, mais le coût unitaire en résulterait augmenterait de par la nature de cette problématique.

En pratique le taux de conversion nécessite un calcul économique plus précis, à la fois par les coûts des équipements et la fiabilité des statistiques de l'ensoleillement pour un site donné.

La mise en place d'une installation de production d'eau chaude sanitaire n'assure donc pas le recouvrement de tous les besoins, le complément de chauffage de l'eau chaude sanitaire est alors assuré par une installation d'appoint au gaz dimensionnée pour satisfaire les besoins des mois les plus chargés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Ministère de l'Énergie et des Mines** 'Bilan de secteur de l'énergie et des mines 2005-2010, www.mem-algeria.org.
- [2] **Lycia Brahmi** énergie solaire, Faculté de Provence France (2009)
- [3] **Ministère de l'Énergie et des Mines**, Guide des énergies renouvelables, Edition 2007
- [4] **Architecture et Climat UCL** : Programme soltherm de la region wallonne Utilisation domestique de l'énergie solaire : Les chauffe-eau solaires, '*Université catholique de Louvain* (2004).
- [5].**Najoua ZARAI1, Maher CHAABANE**, Outil de planification de la production thermique des capteurs solaires, **International Renewable Energy Congress**, November 5-7, 2010 – Sousse, Tunisia
- [6] **W.Palz**, électricité solaire, dunod éditeur. Paris 1981
- [7] **André Joffre**, énergie solaire thermique dans le bâtiment chauffe-eau solaire, Technique ingénieur BE 9164 (2004).
- [8] **BOULKAMH MOURAD**, Contribution à l'étude, la simulation et l'analyse des pompes à chaleur assistées par l'énergie solaire ' .mémoire de magister université Mentouri Constantine faculté des sciences de l'ingénieur (2008)
- [9] **MOUSSI Mohamed lamine**, Étude analytique et expérimentale d'un capteur solaire plan. Mémoire de fin étude. Département de Génie Mécanique ENP (2009)
- [10]**S.Thiers**, L'énergie solaire et ses applications, EPF 2010
- [11] **Duffie, J. A., Beckman, W. A.**, Solar engineering of thermal processes. 1980, 2nd Ed, Wiley-Interscience Edition. New York 1974.
- [12] **Centre de la technologie de l'énergie**, analyse de projets de chauffage solaire de l'eau. www.Retscreen.net.
- [13] **Centre de la technologie de l'énergie CANMET - Varennes (CTEC)**, analyse de projets de chauffage solaire de l'eau, Ministre de Ressources naturelles Canada 2001 - 2004
- [14] **NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data**
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>

[15] **BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine**, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, thèse de doctorat, **Option « Electronique et Modélisation » Tlemcen (2008-2009)**

ANNEXE A

Les rayonnements extraterrestres mensuels

| ϕ | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 90 | 0.0 | 0.0 | 1.2 | 19.3 | 37.2 | 44.8 | 41.2 | 26.5 | 5.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 85 | 0.0 | 0.0 | 2.2 | 19.2 | 37.0 | 44.7 | 41.0 | 26.4 | 6.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 80 | 0.0 | 0.0 | 4.7 | 19.6 | 36.6 | 44.2 | 40.5 | 26.1 | 9.0 | 0.6 | 0.0 | 0.0 |
| 75 | 0.0 | 0.7 | 7.8 | 21.0 | 35.9 | 43.3 | 39.8 | 26.3 | 11.9 | 2.2 | 0.0 | 0.0 |
| 70 | 0.1 | 2.7 | 10.9 | 23.1 | 35.3 | 42.1 | 38.7 | 27.5 | 14.8 | 4.9 | 0.3 | 0.0 |
| 65 | 1.2 | 5.4 | 13.9 | 25.4 | 35.7 | 41.0 | 38.3 | 29.2 | 17.7 | 7.8 | 2.0 | 0.4 |
| 60 | 3.5 | 8.3 | 16.9 | 27.6 | 36.6 | 41.0 | 38.8 | 30.9 | 20.5 | 10.8 | 4.5 | 2.3 |
| 55 | 6.2 | 11.3 | 19.8 | 29.6 | 37.6 | 41.3 | 39.4 | 32.6 | 23.1 | 13.8 | 7.3 | 4.8 |
| 50 | 9.1 | 14.4 | 22.5 | 31.5 | 38.5 | 41.5 | 40.0 | 34.1 | 25.5 | 16.7 | 10.3 | 7.7 |
| 45 | 12.2 | 17.4 | 25.1 | 33.2 | 39.2 | 41.7 | 40.4 | 35.3 | 27.8 | 19.6 | 13.3 | 10.7 |
| 40 | 15.3 | 20.3 | 27.4 | 34.6 | 39.7 | 41.7 | 40.6 | 36.4 | 29.8 | 22.4 | 16.4 | 13.7 |
| 35 | 18.3 | 23.1 | 29.6 | 35.8 | 40.0 | 41.5 | 40.6 | 37.3 | 31.7 | 25.0 | 19.3 | 16.8 |
| 30 | 21.3 | 25.7 | 31.5 | 36.8 | 40.0 | 41.1 | 40.4 | 37.8 | 33.2 | 27.4 | 22.2 | 19.9 |
| 25 | 24.2 | 28.2 | 33.2 | 37.5 | 39.8 | 40.4 | 40.0 | 38.2 | 34.6 | 29.6 | 25.0 | 22.9 |
| 20 | 27.0 | 30.5 | 34.7 | 37.9 | 39.3 | 39.5 | 39.3 | 38.2 | 35.6 | 31.6 | 27.7 | 25.8 |
| 15 | 29.6 | 32.6 | 35.9 | 38.0 | 38.5 | 38.4 | 38.3 | 38.0 | 36.4 | 33.4 | 30.1 | 28.5 |
| 10 | 32.0 | 34.4 | 36.8 | 37.9 | 37.5 | 37.0 | 37.1 | 37.5 | 37.0 | 35.0 | 32.4 | 31.1 |
| 5 | 34.2 | 36.0 | 37.5 | 37.4 | 36.3 | 35.3 | 35.6 | 36.7 | 37.2 | 36.3 | 34.5 | 33.5 |
| 0 | 36.2 | 37.4 | 37.8 | 36.7 | 34.8 | 33.5 | 34.0 | 35.7 | 37.2 | 37.3 | 36.3 | 35.7 |
| -5 | 38.0 | 38.5 | 37.9 | 35.8 | 33.0 | 31.4 | 32.1 | 34.4 | 36.9 | 38.0 | 37.9 | 37.6 |
| -10 | 39.5 | 39.3 | 37.7 | 34.5 | 31.1 | 29.2 | 29.9 | 32.9 | 36.3 | 38.5 | 39.3 | 39.4 |
| -15 | 40.8 | 39.8 | 37.2 | 33.0 | 28.9 | 26.8 | 27.6 | 31.1 | 35.4 | 38.7 | 40.4 | 40.9 |
| -20 | 41.8 | 40.0 | 36.4 | 31.3 | 26.6 | 24.2 | 25.2 | 29.1 | 34.3 | 38.6 | 41.2 | 42.1 |
| -25 | 42.5 | 40.0 | 35.4 | 29.3 | 24.1 | 21.5 | 22.6 | 27.0 | 32.9 | 38.2 | 41.7 | 43.1 |
| -30 | 43.0 | 39.7 | 34.0 | 27.2 | 21.4 | 18.7 | 19.9 | 24.6 | 31.2 | 37.6 | 42.0 | 43.8 |
| -35 | 43.2 | 39.1 | 32.5 | 24.8 | 18.6 | 15.8 | 17.0 | 22.1 | 29.3 | 36.6 | 42.0 | 44.2 |
| -40 | 43.1 | 38.2 | 30.6 | 22.3 | 15.8 | 12.9 | 14.2 | 19.4 | 27.2 | 35.5 | 41.7 | 44.5 |
| -45 | 42.8 | 37.1 | 28.6 | 19.6 | 12.9 | 10.0 | 11.3 | 16.6 | 24.9 | 34.0 | 41.2 | 44.5 |
| -50 | 42.3 | 35.7 | 26.3 | 16.8 | 10.0 | 7.2 | 8.4 | 13.8 | 22.4 | 32.4 | 40.5 | 44.3 |
| -55 | 41.7 | 34.1 | 23.9 | 13.9 | 7.2 | 4.5 | 5.7 | 10.9 | 19.8 | 30.5 | 39.6 | 44.0 |
| -60 | 41.0 | 32.4 | 21.2 | 10.9 | 4.5 | 2.2 | 3.1 | 8.0 | 17.0 | 28.4 | 38.7 | 43.7 |
| -65 | 40.5 | 30.6 | 18.5 | 7.9 | 2.1 | 0.3 | 1.0 | 5.2 | 14.1 | 26.2 | 37.8 | 43.7 |
| -70 | 40.8 | 28.8 | 15.6 | 5.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 2.6 | 11.1 | 24.0 | 37.4 | 44.9 |
| -75 | 41.9 | 27.6 | 12.6 | 2.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.8 | 8.0 | 21.9 | 38.1 | 46.2 |
| -80 | 42.7 | 27.4 | 9.7 | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.0 | 20.6 | 38.8 | 47.1 |
| -85 | 43.2 | 27.7 | 7.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.4 | 20.3 | 39.3 | 47.6 |
| -90 | 43.3 | 27.8 | 6.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.4 | 20.4 | 39.4 | 47.8 |

ANNEXE B : programme de calcul

%programme de calcul des rayonnements solaires reçu sur un plan incliné de la région de Batna

f=fopen('D:\mat\at.txt','a');

```

%introduire les données géographique latitude, les rayonnements solaire horizontale
for i=1:365
    if (i<32)
        kt=0.505;
        h=9;
        r=1.96;
    end
    if (i>31)&&(i<61)
        kt=0.548;
        h=12.42;
        r=1.62;
    end
    if (i>60)&&(i<92)
        kt=0.555;
        h=16.24;
        r=1.30;
    end
    if (i>91)&&(i<122)
        kt=0.557;
        h=19.84;
        r=1.03;
    end
    if (i>121)&&(i<153)
        kt=0.575;
        h=22.97;
        r=0.85;
    end
    if (i>152)&&(i<183)
        kt=0.6;
        h=24.95;
        r=0.77;
    end
    if (i>182)&&(i<214)
        kt=0.632;
        h=25.67;
        r=0.80;
    end
    if (i>213)&&(i<245)
        kt=0.589;
        h=21.89;
        r=0.94;
    end
    if (i>244)&&(i<275)
        kt=0.557;
        h=17.50;
        r=1.18;
    end
    if (i>274)&&(i<306)
        kt=0.527;
        h=12.90;
    end
end

```

```

    r=1.50;
end
if (i>305)&&(i<336)
    kt=0.506;
    h=9.54;
    r=1.87;
end
if (i>335)&&(i<366)
    kt=0.494;
    h=8.06;
    r=2.10;
end
%tire la déclinaison solaire
d=23.45*sind(2*180*(284+i)/365);
ws=acosd(-tand(35.8)*tand(d));
if (kt<0.35)
    hd=h*(1-0.249*kt);
end
if (kt>0.35)&&(kt<0.75)
    hd=h*(1.557-1.84*kt);
end
if(kt>0.75)
    hd=h*0.177
end
hb=h-hd;
%tire le rayonnement solaire global
ht=hb*r+hd*0.905+0.02*h;
fprintf(f,'%d\t%f\t%f\t%f\n',i,hd,hb,ht);
end
fclose(f);

```