

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 haut plateaux**

Proposé et dirigé par :

Pr. M^r. AIT ALI

présenté par :

BOUKANDOURA Abdelmalek

Promotion: 2012

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

ملخص

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.

Dédicaces

A mon père et ma mère;

A mes frères ;

A toute la famille;

A mon promoteur Mr AIT ALI;

A tous mes amis;

Et tout qui j'ai connus durant ma formation

Je dédie ce travail.

Abdelmalek

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 le mérite 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 d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je tiens également à ne pas oublier tous mes amis et mes camarades de la promotion, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.

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 des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
INTRODUCTION GENERALE	
I. CHAPITRE 1 : GENERALITES.....	3
I.1 Énergie solaire.....	3
I.1.1 Le solaire passif :.....	4
I.1.2 Le solaire thermique :.....	4
I.1.3 Solaire thermodynamique ou industriel :.....	5
I.1.4 Solaire photovoltaïque :.....	6
I.2 Gisement solaire en Algérie.....	7
I.3 Utilisation l'énergie solaire thermique.....	8
I.3.1 Production d'eau chaude sanitaire.....	9
I.3.2 L'architecture de chauffage solaire passive.....	13
II. Chapitre 2 : capteur solaire thermique.....	19
II.1 Principe.....	19
II.2 Type des capteurs solaire.....	20
II.2.1 Capteur plan sans vitrage.....	20
II.2.2 Capteur plan avec vitrage.....	20
II.2.3 Capteur à tube sous vide.....	21
II.3 Les différents composants d'un capteur solaire plan vitré.....	22
II.3.1 L'absorbeur.....	22
II.3.2 Le fluide caloporteur.....	24
II.3.3 La couverture transparente.....	24

II.3.4	L'isolation thermique.....	25
II.3.5	Coffre.....	26
II.4	Classification des capteurs.....	27
II.4.1	Le fluide de travail utilisé :.....	27
II.4.2	L'orientation des capteurs.....	27
II.4.3	Les types des composants.....	28
II.5	Fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	28
II.6	Bilan thermique du capteur plan vitre.....	29
II.6.1	Rendements d'un capteur solaire.....	31
II.7	Les différents modes de transferts thermiques.....	31
II.7.1	La conduction.....	31
II.7.2	La convection.....	32
II.7.3	Le rayonnement.....	32
II.8	Pertes thermiques du capteur :.....	33
II.8.1	Pertes à l'avant du capteur :.....	34
II.8.2	Pertes à l'arrière du capteur :.....	37
II.8.3	Pertes par les faces latérales du capteur :.....	37
III.	CHAPITRE 3 : MODELISATION.....	39
III.1	Description du model physique étudié.....	39
III.2	Principe de fonctionnement.....	39
III.2.1	Système solaire :.....	39
III.2.2	Système de distribution.....	40
III.3	Système solaire.....	40
III.3.1	Système de captage.....	40
III.3.2	Estimation du rayonnement solaire.....	41
III.4	Système de Transfer (circuit primaire).....	47
III.4.1	Circuit primaire classique.....	47

III.4.2	Circuits primaires à vidange	52
III.5	Système de stockage	53
III.5.1	Dimensionnement du stockage	54
III.5.2	Pertes thermiques de stockage :	54
III.6	Contrôle de la chaleur	55
III.6.1	Principe de la régulation	55
III.6.2	Régulation de base	55
III.6.3	Régulations évoluées	56
III.7	Système de distribution	57
III.7.1	Pertes de charge	57
III.7.2	Dimensionnement des canalisations	59
III.7.3	Dimensionnement des vannes et robinets :	59
IV.	Chapitre IV : DIMENSIONNEMENT	61
IV.1	Définitions	61
IV.1.1	Fraction solaire	61
IV.1.2	Rendement d'un chauffe-eau solaire	61
IV.2	Paramètres de dimensionnement	61
IV.2.1	Demande journalière	61
IV.2.2	L'orientation et de l'inclinaison du capteur solaire	62
IV.3	Procédure de dimensionnement	62
IV.4	Application	62
IV.4.1	Estimation des rayonnements solaires globales sur un plan incliné	63
IV.4.2	Demande journalière	64
IV.4.3	Système de stockage	65
IV.4.4	Système de captage	65
IV.4.5	Estimation de la température d'eau froide T_f	65
IV.4.6	Estimation des besoins	66

IV.4.7	Les pertes	67
IV.5	Calcul de la fraction solaire	68
IV.5.1	Description de la méthode de f-Chart :	68
IV.5.2	Application la méthode de-Chart	69
IV.6	Dispositifs d'appoint :	70
V.	Analyse des Résultat	72
V.1	Rayonnement solaire reçu sur un plan incliné	72
V.2	Fraction solaire	73

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE A : Les rayonnements mensuels extraterrestres

ANNEXE B : Programme de calcul des rayonnements solaires globaux.

Liste des figures :

Figure I.1:Distribution du rayonnement solaire annuel dans le globe (KWh/m ² année)...	4
Figure I.2 : Schéma explicite de la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique.	5
Figure I.3:Miroir parabolique concentrateur.	6
Figure I.4:Centrale solaire en Californie.	6
Figure I.5: Cellules photovoltaïques	6
Figure I.6: Les différentes zones du gisement solaire en l'Algerie	7
Figure I.7: Système de production d'eau chaude domestique(Thermosiphon)	9
Figure I.8:Schéma d'un système solaire résidentiel typique	10
Figure I.9:Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur	11
Figure I.10:Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc	12
Figure I.11 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés	13
Figure I.12: Travail en coupe des ouvertures et programmation des apports solaires lumineux et thermiques.....	14
Figure I.13 : fenêtre solaire.....	14
Figure I.14:Schéma de principe du mur capteur.....	15
Figure I.15:Schéma de principe de capteur a air	16
Figure I.16:Principe de fonctionnement de l'isolation transparente.....	17
Figure I.17:Eléments d'une façade double peau.....	18
Figure II.1:Capteur solaire thermique.....	19
Figure II.2:Capteur solaire sans vitrage	20
Figure II.3:Capteurs solaires plans avec vitrage	21
Figure II.4:Capteur à tube sous vide	22
Figure II.5: Composant d'un capteur solaire plan	22
Figure II.6: Flux d'énergie dans un capteur solaire	29
Figure II.7: Les différents modes de transfert thermique	31
Figure II.8: Circuit analogique.....	33
Figure III.1: Systeme solaire.....	40
Figure III.2: Différents angles utilisés pour le repérage du soleil	41
Figure III.3: Équation du temps.....	42
Figure III.4:Les différents types des rayonnements solaires	44
Figure III.5:Diagramme de Kt	45

Figure III.6:Isolation des conduites	48
Figure III.7: Circulateur.....	49
Figure III.8:Echangeur interne.....	50
Figure III.9:Modèle d'un clapet anti-retour.....	51
Figure III.10: Ballon de stockage solaire standard	54
Figure III.11 : Rôle de la circulation dans un montage de base.....	55
Figure III.12: Diagramme de Moody.....	58
Figure IV.1: Organigramme de calcul du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée	63
Figure V.1: Evolution des irradiances solaires	72

Liste des tableaux

Tableau I.1:Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	8
Tableau II.1:Conductivité des matériaux.....	23
Tableau II.2:Les propriétés des matériaux.....	24
Tableau II.3:Les caractéristiques optiques des vitrages.....	25
Tableau II.4:Conductivité des isolations	26
Tableau IV.1:Les données géographiques	62
Tableau IV.2 : Les rayonnements solaires reçus sur un plan incliné.....	64
Tableau IV.3: La demande moyenne en eau chaude sanitaire.....	64
Tableau IV.4:Les températures mensuelles	66
Tableau IV.5:Les besoin de chauffage d'eau.....	67
Tableau IV.6:Les pertes mensuelles de stockage	68
Tableau IV.7:Les résultats de la méthode de f Chart.....	69

INTRODUCTION GENERALE

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 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 énergie, 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. En Algérie la consommation globale d'énergie, a augmenté entre l'année 2009 et 2010 de 30.9 MTEP à 31.64 MTEP [1]. Le secteur ménage domine avec 45.7%, suivi du secteur des transports à 27.8% et ensuite l'industriel-BTP à 26.8%. La consommation d'énergie finale aura augmentée de 203,4% entre les années 2010 et 2040 [1].

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 dans des conditions de cout compétitif.

Notre travail "Avant-projet de chauffe-eau solaire pour immeuble urbaine et climat haut plateau " est l'un des applications de l'énergie renouvelable pour diminuer la consommation des énergies fossiles.

I. CHAPITRE 1 : GENERALITES

I.1 Énergie solaire

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre, qui se trouve à une distance d'environ 150 millions Km de notre planète, avec un diamètre 1 300 000 fois 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. L'énergie solaire reçue chaque année sur la terre équivaut à plus de 20 fois nos besoins énergétiques (d'après HESPUL) [2]. 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'usage de 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 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 obtenues à partir de cette dernière. On distingue plusieurs types d'énergies solaires.

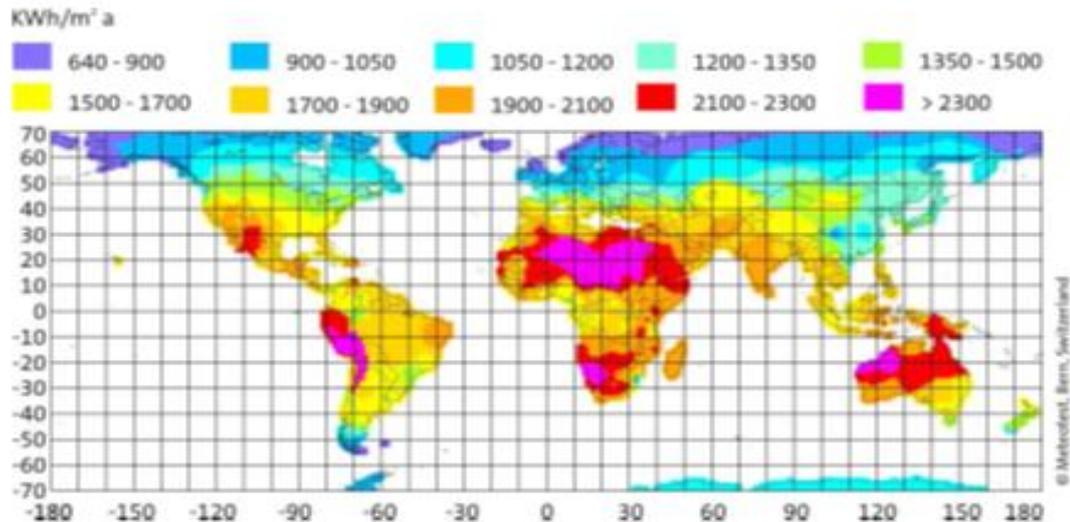


Figure I.1: Distribution du rayonnement solaire annuel dans le globe (KWh/m²année)

I.1.1 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 orientée 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.

I.1.2 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 (le Mono propylène-glycol) ; 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).

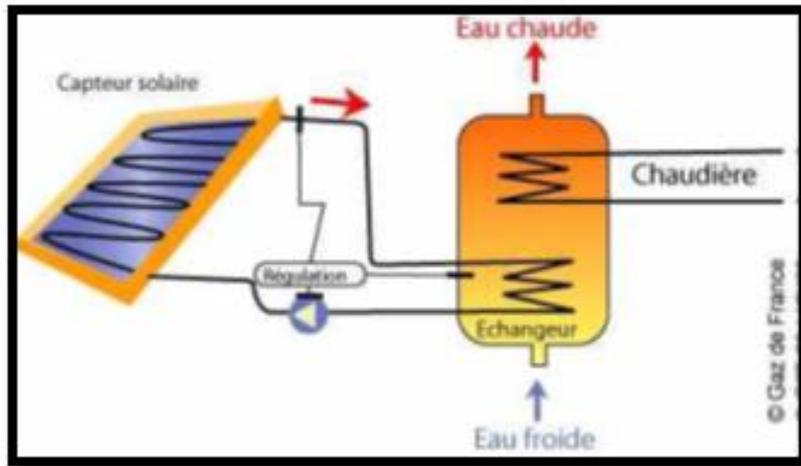


Figure I.2 : Schéma explicite de la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique.

I.1.3 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 où on fait passer un fluide caloporteur pour le chauffer et augmenter sa température ; ensuite ce fluide passe dans un échangeur de chaleur pour 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 primaire 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 condensée dans un condenseur jusqu'à ce qu'elle devient liquide ; puis elle sera refoulée dans le réservoir de chauffage et ainsi de suite le cycle se répète.



Figure I.4: Centrale solaire en Californie.



Figure I.3: Miroir parabolique concentrateur.

I.1.4 Solaire photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photoélectrique découvert par Edmond Becquerel en 1839) ; Einstein a aussi publié 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 créés sont canalisées pour fournir un



Figure I.5: Cellules photovoltaïques

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.

I.2 Gisement solaire en Algérie

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 possède un gisement solaire important ; de par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1 KW/m². L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6 KWh/m².

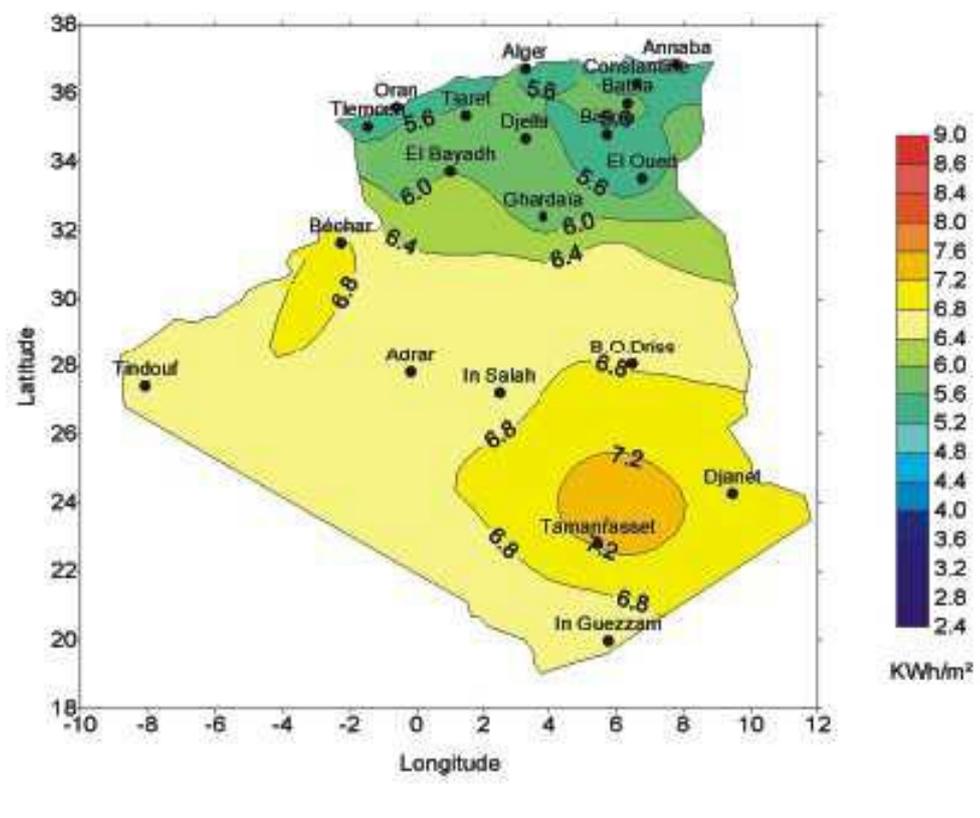


Figure I.6: Les différentes zones du gisement solaire en l'Algérie

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

Le tableau suivant représente ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Tableau I.1: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

La durée d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3 500 h/an et 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].

I.3 Utilisation l'énergie solaire thermique

Parmi les applications d'énergie solaire thermique en trouve :

- production d'eau chaude sanitaire
- Chauffage solaire passif

I.3.1 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)

I.3.1.1 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 I.8* illustre les trois fonctions de base d'un chauffe-eau solaire :

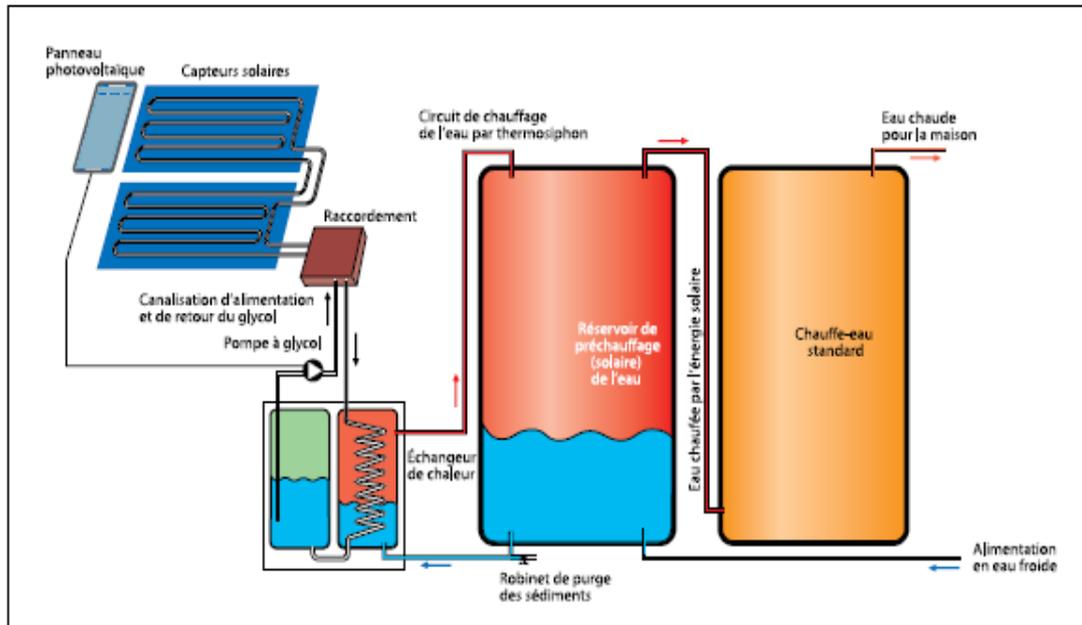


Figure I.8:Schéma d'un système solaire résidentiel typique

❖ **la collecte d'énergie solaire :**

le 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 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.

I.3.1.2 Technologie des chauffe-eau solaire

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

I.3.1.2.1 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 basse, 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.

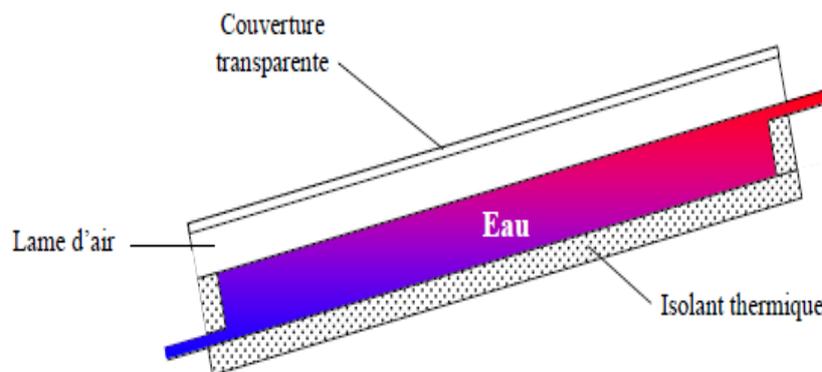


Figure I.9:Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

I.3.1.2.2 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(I.10), 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.

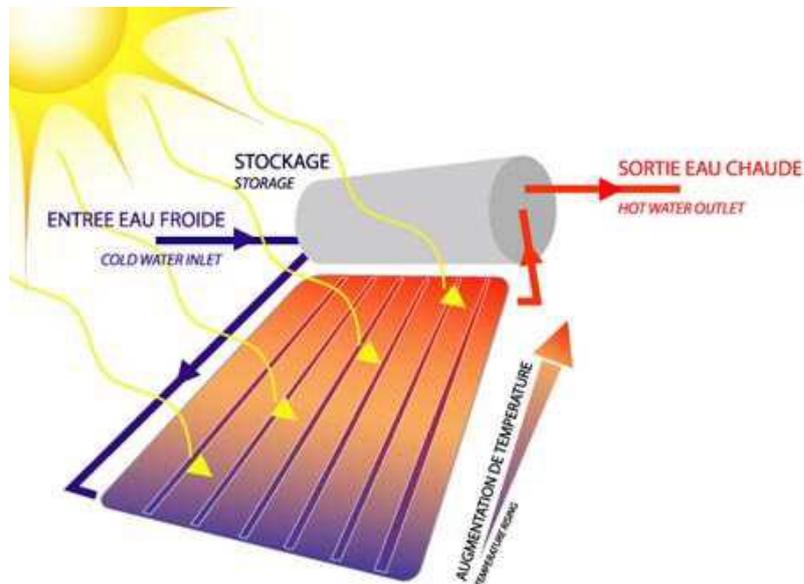


Figure I.10:Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc

I.3.1.2.3 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.

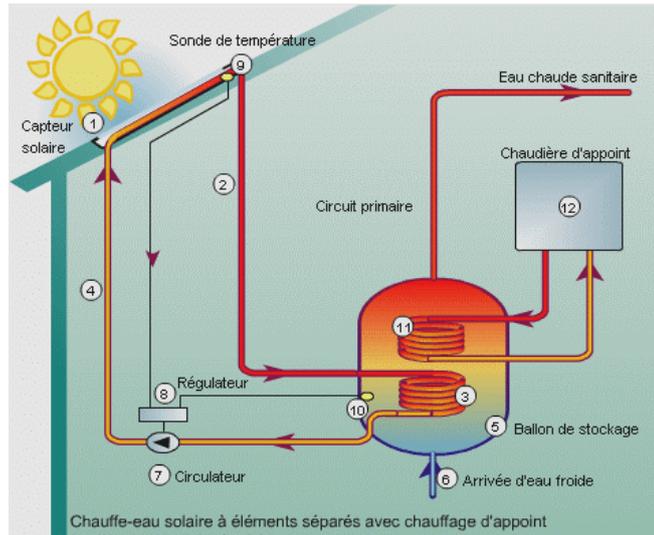


Figure I.11: Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

I.3.2 L'architecture de chauffage 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].

I.3.2.1 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].

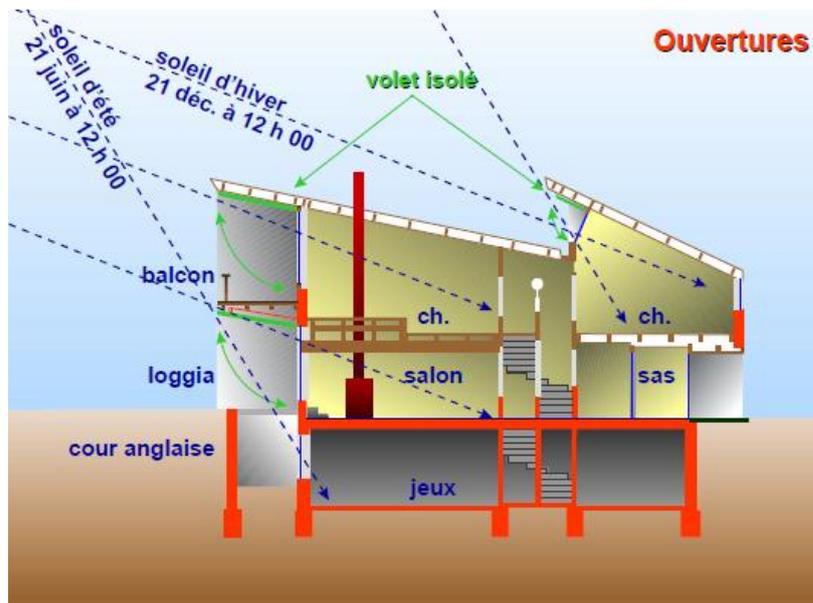


Figure I.12: Travail en coupe des ouvertures et programmation des apports solaires lumineux et thermiques

I.3.2.2 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



Figure I.13 : fenêtre solaire

diffuser une partie de la lumière incidente.

I.3.2.3 Murs capteurs

Les murs capteurs captent l'énergie solaire, l'accumulent dans leur masse, la diffusent 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.

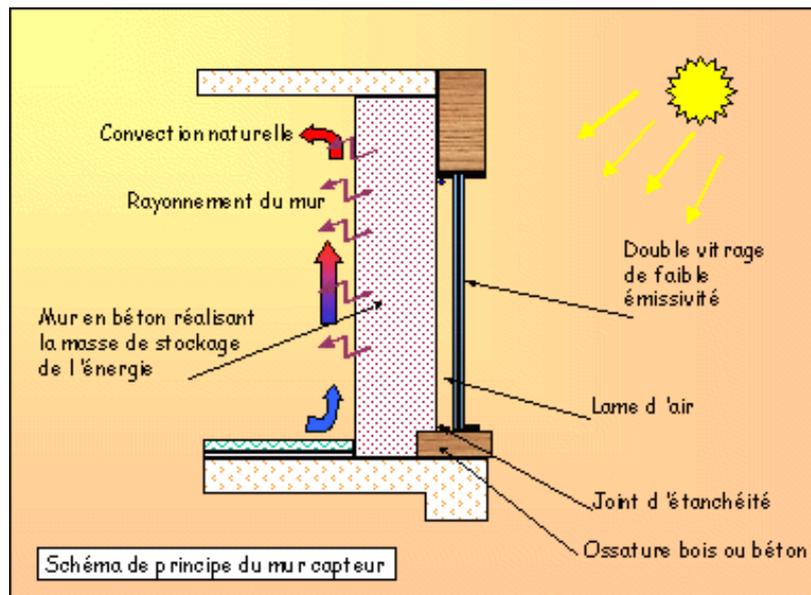


Figure I.14:Schéma de principe du mur capteur

I.3.2.4 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.). 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/m^2), 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 du bâtiment, de manière à ce que ses déperditions profitent de préférence en direction des pièces froides et peu ensoleillées.

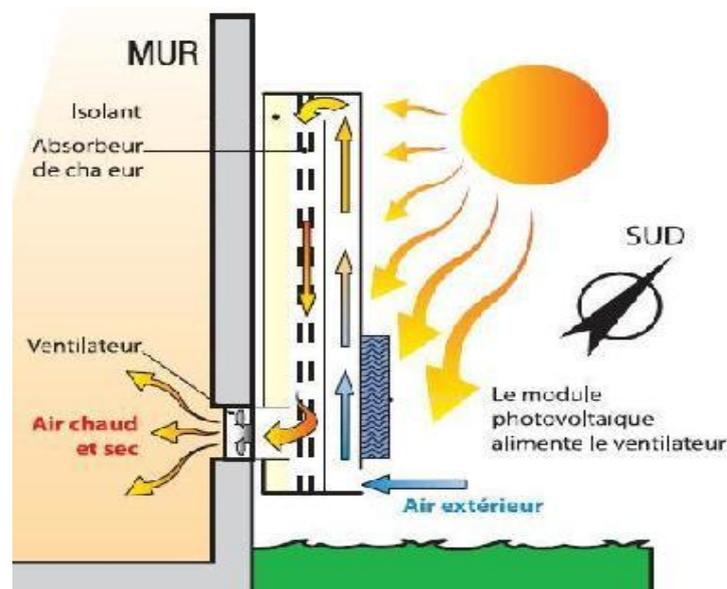


Figure I.15:Schéma de principe de capteur a air

I.3.2.5 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.

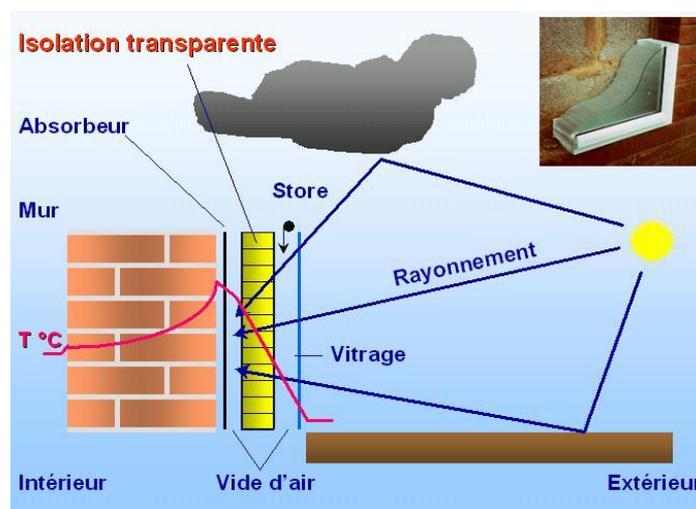


Figure I.16: Principe de fonctionnement de l'isolation transparente

I.3.2.6 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.

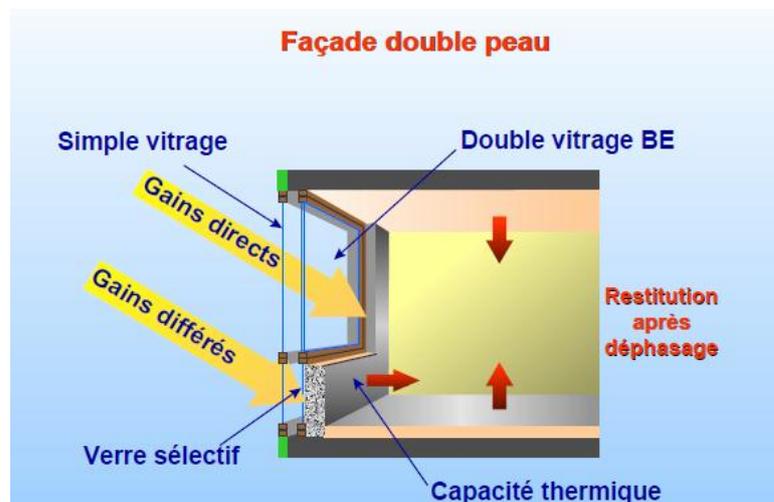


Figure I.17:Eléments d'une façade double peau

II. Chapitre 2 : capteur solaire thermique

II.1 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.

II.2 Type des capteurs solaire

II.2.1 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.

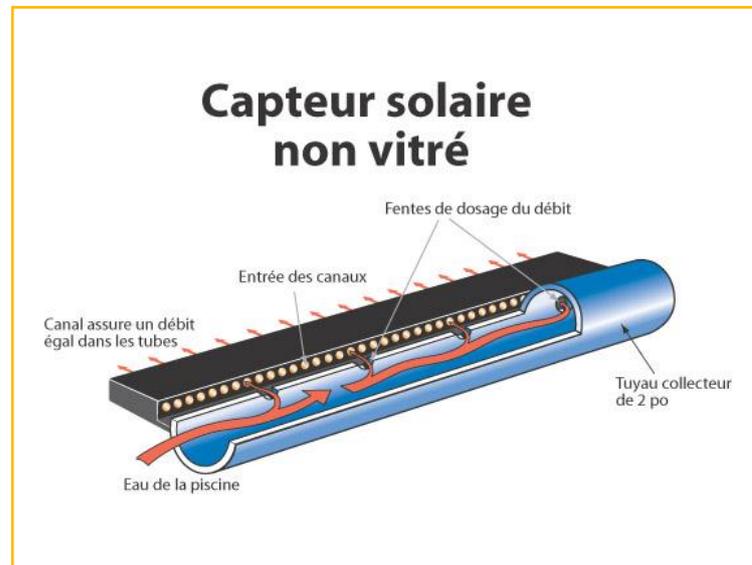


Figure II.2: Capteur solaire sans vitrage

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, particulièrement dans les endroits venteux. 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.

II.2.2 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).

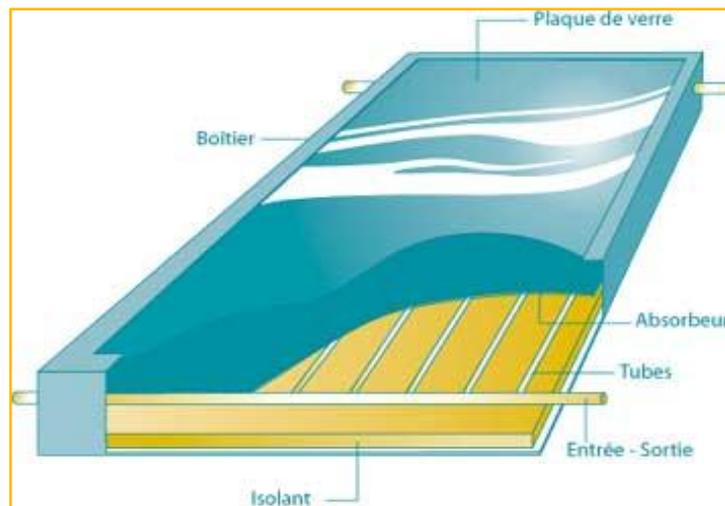


Figure II.3: Capteurs solaires plans avec vitrage

II.2.3 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 [5].

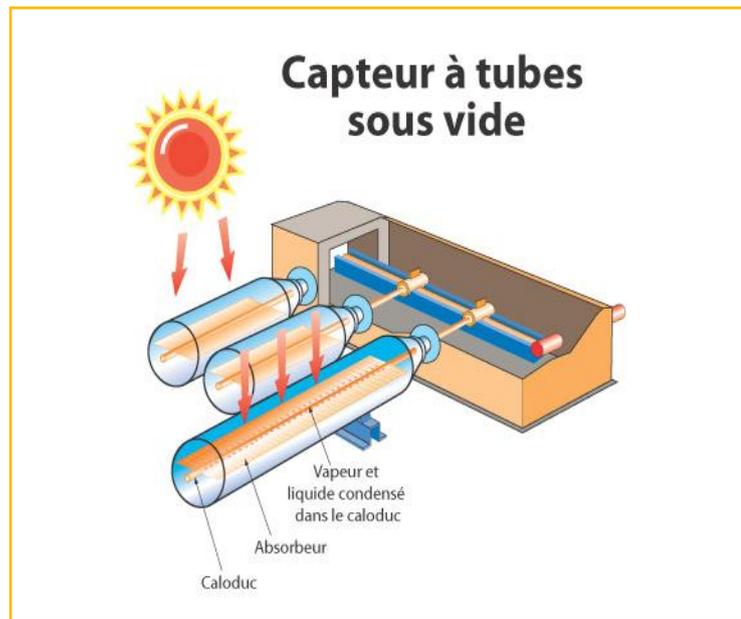


Figure II.4: Capteur à tube sous vide

II.3 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.

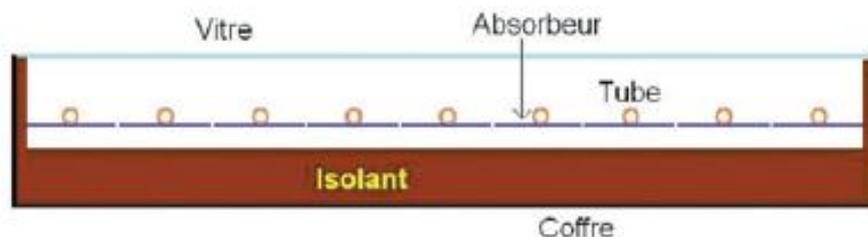


Figure II.5: Composant d'un capteur solaire plan

II.3.1 L'absorbeur

L'absorbeur est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer 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 entraîne 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.

Tableau II.1: Conductivité des matériaux

Types	Conductivité (W /m. °c)
Cuivre	380
Aluminium	230
Inox	52

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 [6].

Tableau II.2:Les propriétés des matériaux

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

II.3.2 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 ($\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) pour l'air contre $4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'eau.
 - Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

II.3.3 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 au vieillissement.

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 [7].

Tableau II.3: Les caractéristiques optiques des vitrages

Nature	Transmission (%)	Réflexion (%)	Absorption (%)
Verre clair	83	8	9
Verre trempé	90	8	2

II.3.4 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 exposé à un fort ensoleillement sans circulation de fluide caloporteur, l'absorbeur peut atteindre des températures très élevées supérieures à 150°C [7]. Ce phénomène, s'il se reproduit régulièrement, peut entraîner la destruction des isolants courants tels que les mousses de polyuréthane. Le polystyrène expansé dont la température limite d'utilisation est nettement inférieure à 100 °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 résistants 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 condensats 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 est 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).

Tableau II.4: Conductivité des isolations

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

II.3.5 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 constitués de profilés périphériques (souvent en aluminium) sur lesquels est fixée une protection (feuille de métal ou de matière de plastique) qui assure l'étanchéité arrière.

Les matériaux les plus utilisés, pour constituer le fond du coffre sont le métal (tôle d'acier pré laquée ou d'aluminium) et les matières plastiques [ABS (polyacrylonitrile-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.

II.4 Classification des capteurs

On peut classer les capteurs selon :

II.4.1 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.

II.4.2 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 la quantité d'énergie captée par unité de surface, donc sa performance. Mais le guidage coûte cher.

II.4.3 Les types des composants

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

II.4.3.1 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 [8].

❖ **Les capteurs solaires à 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 [8].

II.4.3.2 L'absorbeur

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

- ❖ Les capteurs plans.
- ❖ Les capteurs à cavités

II.5 Fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le rayonnement solaire atteint la couverture transparente. Une partie du rayonnement est réfléchi par le vitrage (réflexion au niveau des deux faces) vers

l'environnement. Le rayonnement ensuite atteint la couche sélective de l'absorbeur où une nouvelle fraction est réfléchiée vers l'extérieur du capteur. Le reste du rayonnement est transformé en chaleur au niveau de l'absorbeur. L'absorbeur transmet alors cette chaleur par conduction vers le fluide caloporteur (chaleur utile) mais aussi par rayonnement et convection à son environnement (pertes).

Une bonne isolation de la face postérieure et des côtés du capteur permet de minimiser les déperditions thermiques. De même, la couverture transparente en face antérieure a pour but de limiter les pertes thermiques par rayonnement et convection depuis l'absorbeur.

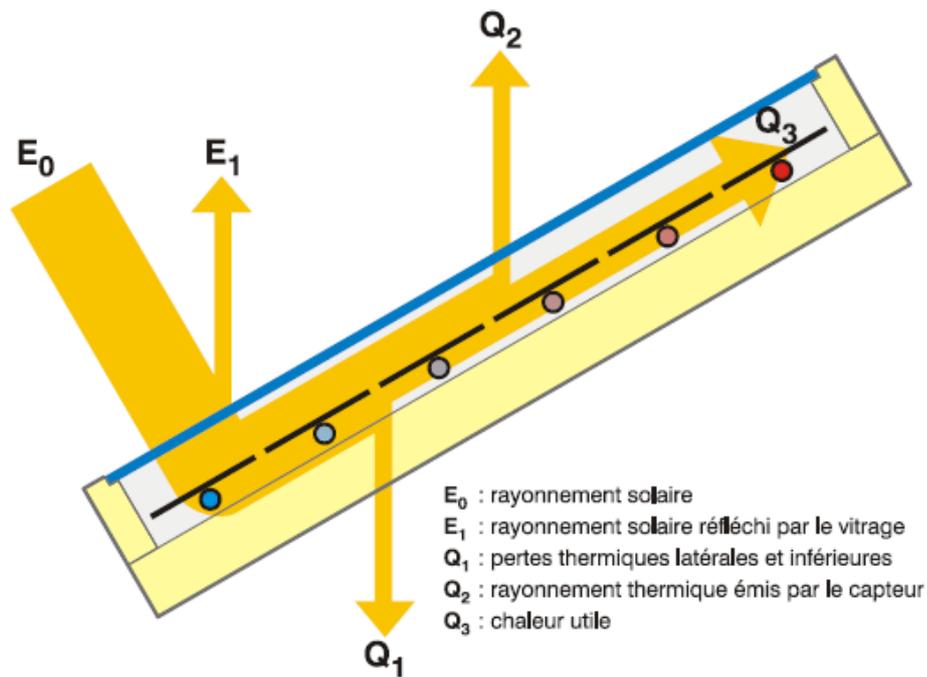


Figure II.6: Flux d'énergie dans un capteur solaire

II.6 Bilan thermique du capteur plan vitre

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit [9] :

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

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

$$\dot{q}_s = (M_e * C_{eau}) * \frac{dT}{dt} \quad (II.2)$$

M_e : Masse en eau du capteur.

T : Température moyenne du capteur.

t : Temps.

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$q_{sp} = \tau_{cs} * \alpha_p * G \quad (II.3)$$

q_{sp} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

G : Eclairement solaire incident sur le capteur (W/m²)

α_p : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire

τ_{cs} : Coefficient de transmission de la couverture transparente.

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

$$q_u = q_{cf} * (T_c - T_{ef}) \quad (II.4)$$

q_{cf} : Débit calorifique du fluide caloporteur (W. °C⁻¹) = débit massique x capacités calorifique

T_{ef} : 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 :

$$q_p = h_p * (T_{pm} - T_a) * S \quad (II.5)$$

h_p : Coefficient global de pertes du capteur

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante

T_a : Température de l'air extérieur

S : Surface de la paroi absorbante.

II.6.1 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 :

$$\eta = \frac{q_u}{G \cdot S} \quad (\text{II.6})$$

Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{q_u}{q_{sp}} \quad (\text{II.7})$$

Le rendement optique :

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

II.7 Les différents modes de transferts thermiques

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

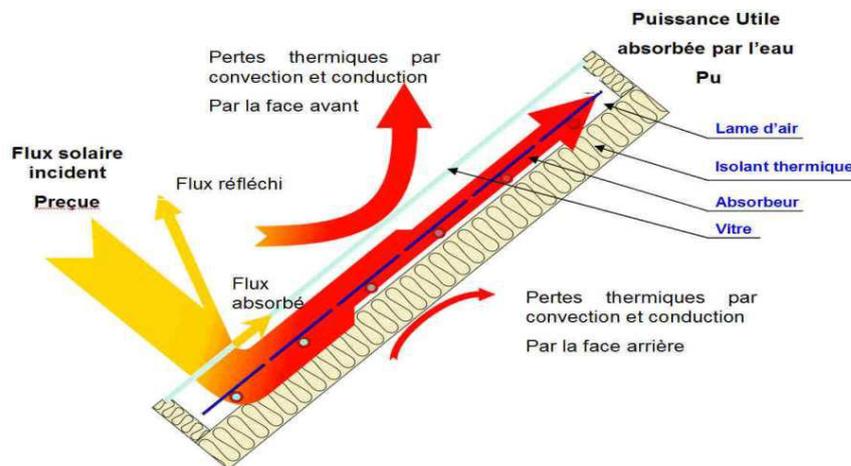


Figure II.7: Les différents modes de transfert thermique

II.7.1 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 :

$$\dot{q} = -k * A * grad T \quad (II.9)$$

\dot{q} : flux de chaleur

k : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange

II.7.2 La convection

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

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 :

$$\dot{q} = h * S * (T_p - T_f) \quad (II.10)$$

\dot{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.

II.7.3 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 :

$$q = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (II.11)$$

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

ε : émissivité thermique du matériau.

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

T : température absolue du corps.

II.8 Pertes thermiques du capteur :

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

$$q_p = q_{av} + q_{ar} \quad (II.12)$$

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.

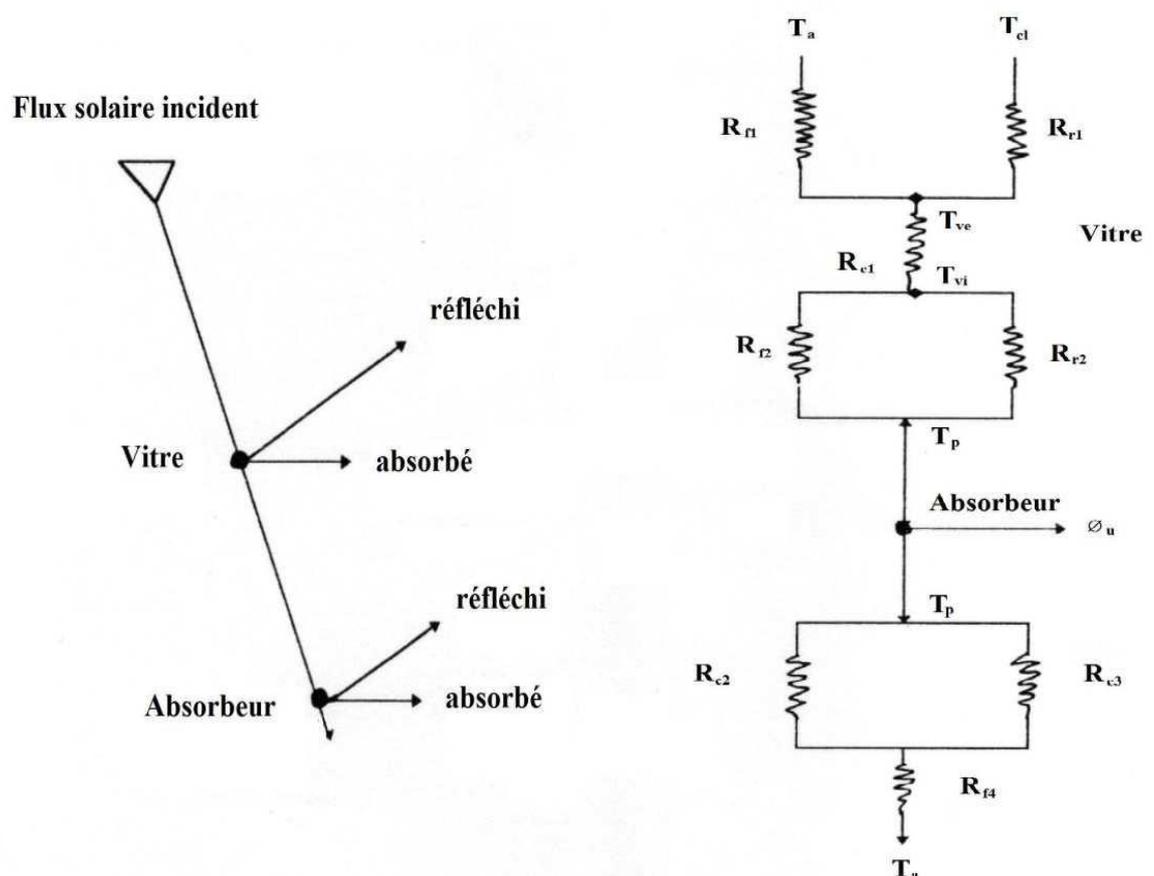


Figure II.8: Circuit analogique

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 [10] :

$$T_{cl} = 0.0552 * T_a^{1.5} \quad (\text{II.12})$$

II.8.1 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.

II.8.1.1 Pertes entre la vitre et le milieu extérieur :

Il y a des pertes par convection et par rayonnement.

Par convection :

$$q_{av1f} = h_{f1} * S * (T_v - T_a) \quad (\text{II.13})$$

Par rayonnement :

$$q_{av1r} = \varepsilon_v * \sigma * S * (T_v^4 - T_{cl}^4) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

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

ε_v : Emissivité du verre.

T_v : la température de vitre .

Et donc :

$$q_{av1} = (h_{f1} + h_{r1}) * (T_v - T_a) * S = \frac{(T_v - T_a) * S}{R_1} \quad (\text{II.15})$$

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

$$h_{r1} = \frac{\varepsilon_v * \sigma * (T_v^4 - T_{cl}^4)}{(T_v - T_a)} \quad (\text{II.16})$$

et

$$R_1 = \frac{1}{h_{f1} + h_{r1}} \quad (\text{II.17})$$

II.8.1.2 Pertes entre la vitre et l'absorbeur :

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

Par convection :

$$q_{av2f} = h_{f2} * S * (T_p - T_v) \quad (\text{II.18})$$

Par rayonnement :

$$q_{av2r} = \frac{\sigma * S * (T_p^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

h_{f2} : 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 :

$$q_{av2} = h_{f2} * S * (T_p - T_v) + \frac{\sigma * S * (T_p^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II.20})$$

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

$$q_{av2} = (h_{f2} + h_{r2}) * (T_p - T_v) * S = \frac{(T_p - T_v) * S}{R_2} \quad (\text{II.21})$$

Où :

$$h_{r2} = \frac{\sigma * (T_p + T_v) * (T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II.22})$$

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

$$R_2 = \frac{1}{h_{f2} + h_{r2}} \quad (\text{II.23})$$

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 [11].

$$U_{av} = \left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_p} * \left[\frac{(T_p - T_a)^e}{N + f} \right]} + \frac{1}{h_{f1}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma * (T_p + T_a) * (T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591 * N * h_{f1})^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 * \varepsilon_p - N}{\varepsilon_v}} \quad (\text{II.24})$$

Où :

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

N : Nombre de couvertures transparentes.

$$f = (1 + 0.089 * h_{f1} - 0.1166 * h_{f1} * \varepsilon_p) * (1 + 0.07866 * N) \quad (\text{II.25})$$

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

$$C = 520 * (1 - 0.000051 * B^2) \quad (\text{II.26})$$

et

$$e = 0.430 * \left(1 - \frac{100}{T_p} \right) \quad (\text{II.27})$$

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.

II.8.2 Pertes à l'arrière du capteur :

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

$$q_{ar1} = \frac{S*(T_p - T_a)}{\frac{e_1}{k} + \frac{1}{h_{f4}}} = \frac{(T_p - T_a)*S}{R_{31}} \quad (\text{II.28})$$

$$R_{31} = \frac{e_1}{k} + \frac{1}{h_{f4}}$$

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.

II.8.3 Pertes par les faces latérales du capteur :

Les pertes perdue par les faces latérales du capteur est :

$$q_{ar2} = \left[\left(\frac{e_2}{k} + \frac{1}{h_{vent}} \right) * \frac{S}{S_{lat}} \right]^{-1} * (T_p - T_a) * S = \frac{(T_p - T_a)*S}{R_{32}} \quad (\text{II.29})$$

Où :

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

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

$$R_{32} = \left(\frac{e_2}{k} + \frac{1}{h_{vent}} \right) * \frac{S}{S_{lat}} \quad (\text{II.30})$$

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

$$U_l = U_{ar} + U_{av} + U_{lat} \quad (\text{II.31})$$

On peut écrire alors que :

$$q_p = U_l * (T_p - T_a) \quad (\text{II.32})$$

III. CHAPITRE 3 : MODELISATION

III.1 Description du model physique étudié

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

- ❖ Système solaire :
 - Captage.
 - Transfer
 - stockage
 - contrôle
- ❖ Système de distribution.

III.2 Principe de fonctionnement

III.2.1 Système solaire :

La boucle solaire est constituée par un système de captage (capteurs solaires) et d'un réservoir de stockage relié entre eux par circuit primaire ; 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 transmise au fluide caloporteur (eau glycol); le rôle circuit primaire est de véhiculer la chaleur des capteurs solaires vers le stockage. Cette énergie thermique est ensuite stockée sous forme de chaleur sensible dans un réservoir jusqu'à ce qu'elle puisse être utilisée.

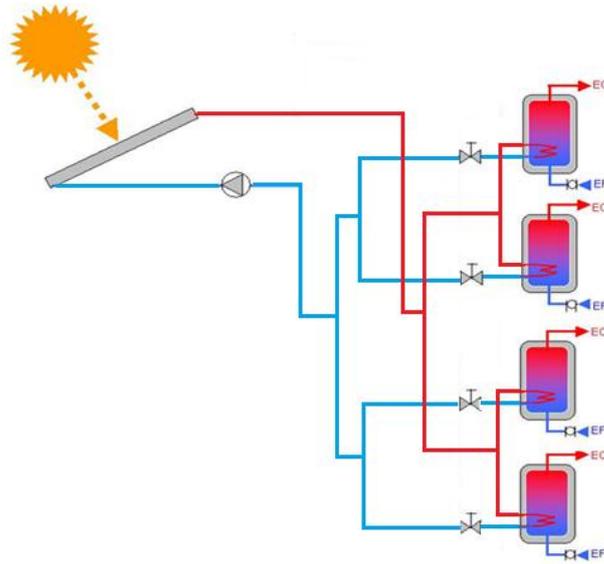


Figure III.1: Systeme solaire

III.2.2 Système de distribution

Ce système assure la distribution d'eau chaude vers le bâtiment par un circuit de tuyauterie constitué de deux circuits primaires et secondaires.

III.3 Système solaire

III.3.1 Système de captage

L'énergie utile q_u délivrer par un capteur solaire plan de surface A_c est donné par l'équation [11] :

$$\dot{q}_u = A_c \times F_r * [G \times \eta_0 - U_l(T_s - T_a)] \quad (III.1)$$

Ou

F_r : Facteur caractérisant les pertes thermiques du capteur plan

G : Intensité des radiations solaires dans le plan du capteur [W/m²]

η_0 : Efficacité optique du capteur

U_l : Coefficient global de perte de chaleur du capteur [W/m²°C]

T_s : Température de stockage qui est la température d'entrée du fluide dans le capteur [°C]

T_a : Température ambiante de l'air.

III.3.2 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.

III.3.2.1 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.

III.3.2.1.1 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 ($\delta=-23^{\circ}27'$). D'hiver Sa valeur en degrés tout au long de l'année, est donnée par la corrélation de Cooper [11]

$$\delta = 23.45^{\circ} * \sin \left[360 * \frac{(284+n)}{365} \right] \quad (\text{III.2})$$

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

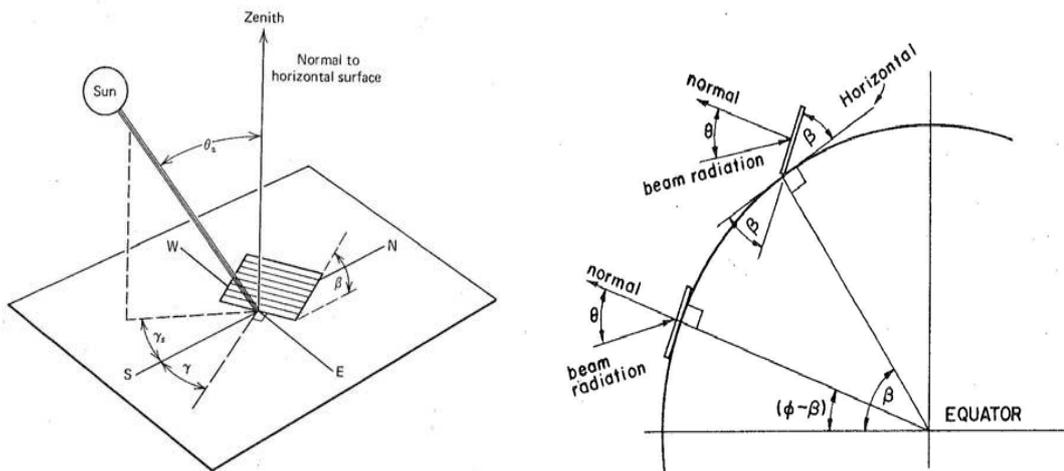


Figure III.2: Différents angles utilisés pour le repérage du soleil

III.3.2.1.2 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 :

$$T_s = T_l + 4 * (L_{tl} + L_{lieu}) + E \quad (III.3)$$

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).

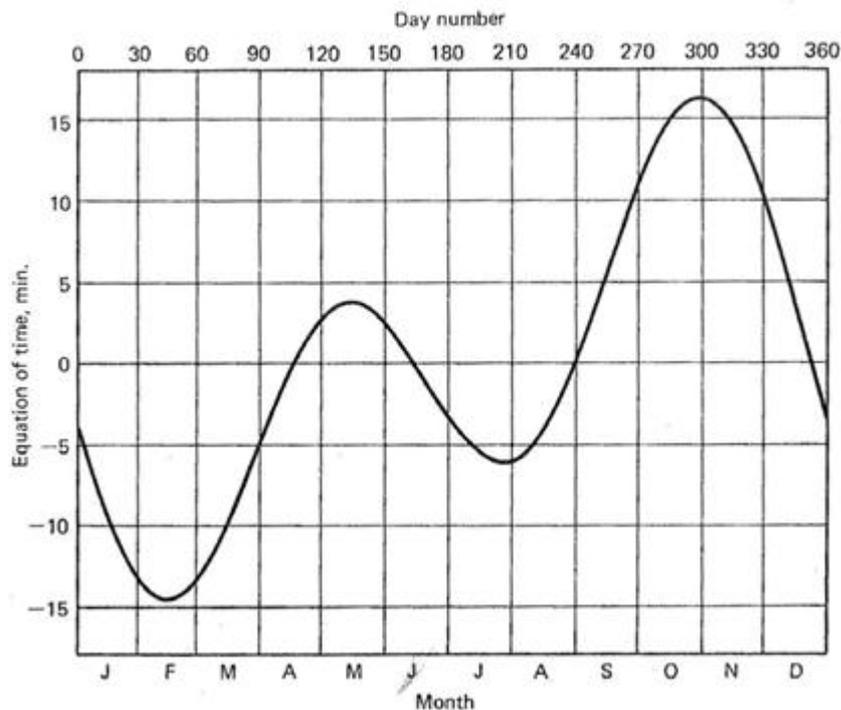


Figure III.3: Équation du temps

L'angle horaire est lié au temps solaire vrai T_{sv} par [11]:

$$\omega = 15 * (T_{sv} - 12) \quad (\text{III.4})$$

Où,

ω : est exprimé en radians et T_{sv} 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 [11] :

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\varphi) * \tan(\delta) \quad (\text{III.5})$$

δ : est la déclinaison solaire.

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

III.3.2.1.3 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 [11] :

$$G_0 = \frac{86400 * G_{sc}}{\pi} * \left(1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2 * \pi * n}{365}\right) \right) * (\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + \omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta)) \quad (\text{III.6})$$

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 [12]:

$$K_t = \frac{G_h}{G_0} \quad (\text{III.7})$$

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).

III.3.2.2 Estimation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques, c'est donc un apport énergétique dispensé 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 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 [11].

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 [10].

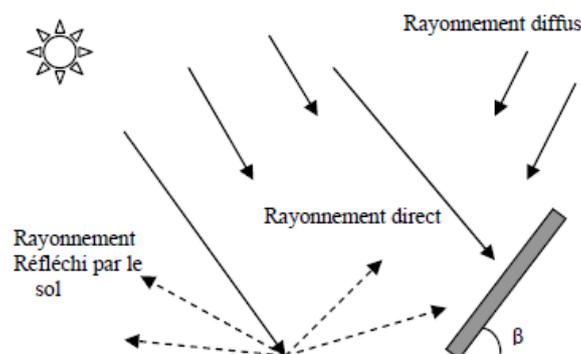


Figure III.4: Les différents types des rayonnements solaires

III.3.2.2.1 Estimation des moyennes mensuelles des rayonnements diffus et direct

En utilise la Corrélation de Orgill et Hollands pour retrouver rayonnement direct et de rayonnement diffus partir de la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global quotidien [12].

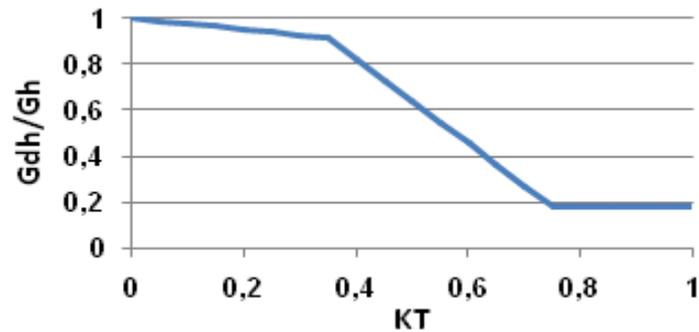


Figure III.5: Diagramme de Kt

$$\frac{G_{dh}}{G_h} = \begin{cases} 1,0 - 0,249 * K_t & \text{si } K_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 * K_t & 0,35 < K_t < 0,75 \\ 0,177 & \text{si } K_t > 0,75 \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

et

$$G_h = G_{dh} + G_{bh} \quad (\text{III.9})$$

G_{bh} : rayonnement solaire direct horizontal quotidien.

G_{dh} : rayonnement solaire diffus horizontal quotidien

III.3.2.2.2 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 [11] :

$$G_b = R_b * G_{bh} \quad (\text{III.10})$$

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 [11] :

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (\text{III.11})$$

Avec:

θ_z : représente l'angle de zénith, il est donné par l'équation suivante [11] :

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) \quad (\text{III.12})$$

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] :

$$\cos(\theta) = \cos(\varphi - \beta) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) * \sin(\delta) \quad (\text{III.13})$$

III.3.2.2.3 Rayonnement diffus sur une surface inclinée

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

$$G_d = G_h * F_d \quad (\text{III.14})$$

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 [11] :

$$F_d = \frac{1}{2} * (1 + \cos(\beta)) \quad (\text{III.15})$$

Ce qui donne :

$$G_d = \frac{1}{2} * G_h * (1 + \cos(\beta)) \quad (\text{III.16})$$

III.3.2.2.4 Rayonnement provenant de la réflexion

Le rayonnement diffusé par le sol, souvent très inférieur au rayonnement diffus du ciel, et il est donné par [11] :

$$G_r = \rho * F * G_h \quad (\text{III.17})$$

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 :

$$F = \frac{1}{2} * (1 - \cos(\beta)) \quad (\text{III.18})$$

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

$$G = G_b + G_d + G_r \quad (\text{III.19})$$

G : rayonnement global sur une surface inclinée.

III.4 Système de Transfer (circuit primaire)

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

III.4.1 Circuit primaire 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.

III.4.1.1 Conduites du 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.

❖ 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. Le matériau utilisé à des températures de l'ordre de 150 à 170°C [4].

L'isolation doit être continue au niveau des raccords, vannes et autres éléments de conduite.

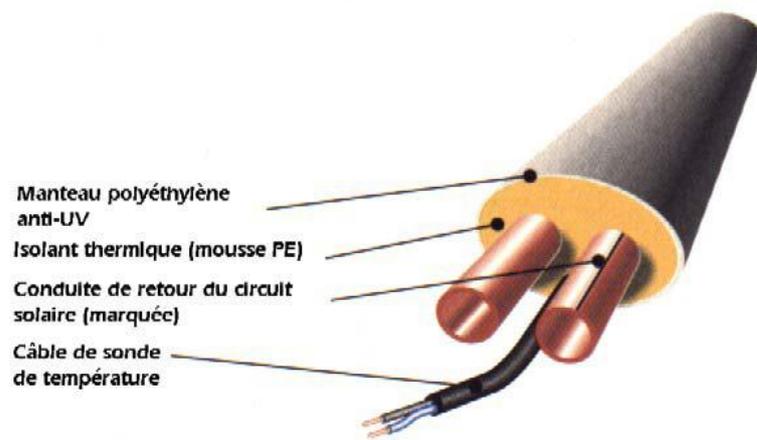


Figure III.6: Isolation des conduites

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.

III.4.1.2 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.

L'addition de propylène glycol permet de repousser la résistance au gel de l'eau jusqu'à -23°C , et d'élever sa température d'ébullition à 150°C [4].

III.4.1.3 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.



Figure III.7: Circulateur

III.4.1.4 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 dont la surface est soit lisse, soit cannelée.

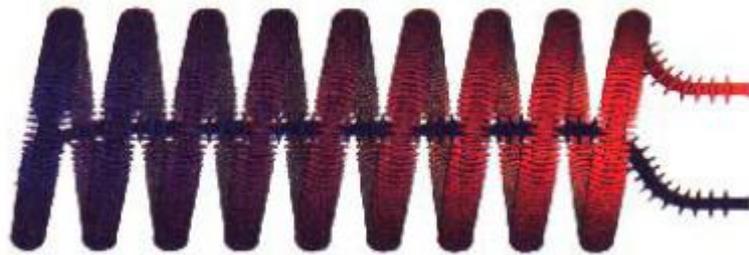


Figure III.8: Echangeur interne

❖ 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 sont généralement utilisés dans les grandes installations solaires où ils peuvent être raccordés à plusieurs ballons de stockage.

III.4.1.5 Clapet anti-retour

Ce sont des composants qui n'autorisent le passage du fluide que dans un seul sens.

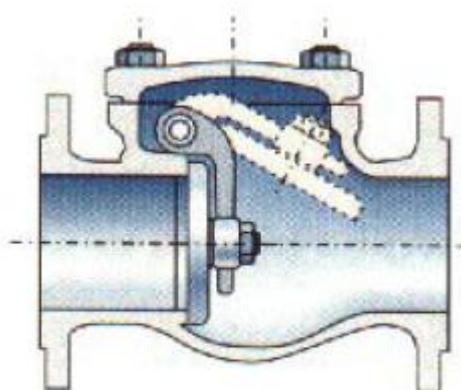


Figure III.9: Modèle d'un clapet anti-retour

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.

III.4.1.6 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.

Les installations solaires doivent être purgées lors du remplissage, et au besoin ultérieurement en cours de fonctionnement.

Le purgeur doit présenter une résistance :

- chimique aux mélanges à base de glycol,
- thermique aux températures de 150°C au minimum [4].

III.4.1.7 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.

III.4.1.8 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 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.

❖ **Vase d'expansion**

Le vase d'expansion est un récipient métallique fermé, muni d'une membrane à mi-hauteur. 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.

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).

III.4.2 Circuits primaires à vidange

Le circuit primaire à vidange se distingue du circuit primaire sous pression classique par le fait que les capteurs solaires sont irrigués par le liquide caloporteur uniquement lorsque l'installation se trouve en fonctionnement. Durant les plages d'arrêt de l'installation, le circulateur étant arrêté, le fluide caloporteur redescend par gravité dans un ballon de vidange situé sous le niveau de toiture. Ce ballon représenté ici pour des raisons didactiques sous la toiture du bâtiment, est en fait généralement placé à proximité ou à l'intérieur du ballon de stockage solaire.

Parmi les avantages que présente ce système on peut citer :

- Protection automatique contre les surpressions dues aux surchauffes : le fluide caloporteur étant évacué, il ne s'évapore pas et l'air contenu dans les capteurs n'induit pas de surpression conséquente en s'échauffant.
- Protection automatique contre le gel lorsque l'installation est à l'arrêt (le fluide caloporteur se trouve sous le niveau de la toiture tant dans la conduite de départ que dans celle de retour.
- Possibilité d'utiliser de l'eau sans additif comme fluide caloporteur
Ce système présente également des inconvénients :
- Installation très délicate afin de garantir une bonne évacuation des capteurs par simple gravité
- Nécessité d'une pompe plus puissante (pour vaincre la pression hydrostatique initiale) et à contrôle du volume pompé

III.5 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.10) présente un ballon de stockage solaire standard. Il présente les caractéristiques suivantes :

- deux échangeurs de chaleur pour deux sources de chaleur (mode de production bivalent) : un échangeur solaire en partie basse et un échangeur pour l'appoint de chaleur en partie haute, au contraire du mode de production classique d'eau chaude sanitaire (monovalent),
- connexion directe à la conduite d'eau potable,
- pression de fonctionnement du ballon : 4 à 6 bars.

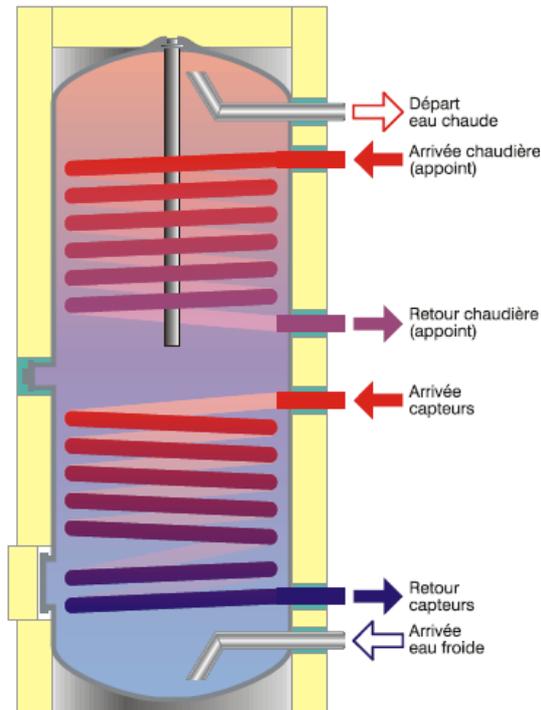


Figure III.10: Ballon de stockage solaire standard

III.5.1 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.

III.5.2 Pertes thermiques de stockage :

Les pertes thermiques q_w du réservoir de stockage sont données par [8]:

$$q_w = (UA)_s(T_s - T_a) \quad (\text{III.20})$$

(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]

III.6 Contrôle de la chaleur

La régulation est bien sûr un élément important d'une installation solaire

III.6.1 Principe de la régulation

Pour qu'un chauffe-eau solaire fonctionne, il faut que la pompe se mette en route lorsque le fluide dans les capteurs est assez chaud, et qu'elle s'arrête lorsque le fluide est trop froid. Le principe est donc simple, reste à définir ce que l'on entend par « assez chaud » et par « trop froid ».

Pour que le système soit efficace, la pompe ne doit faire circuler le fluide que s'il est plus chaud en entrant dans le stock qu'en sortant. C'est donc l'écart de température entre le stock et le panneau qui importe. Cet écart de température est appelé différence de température (DT).

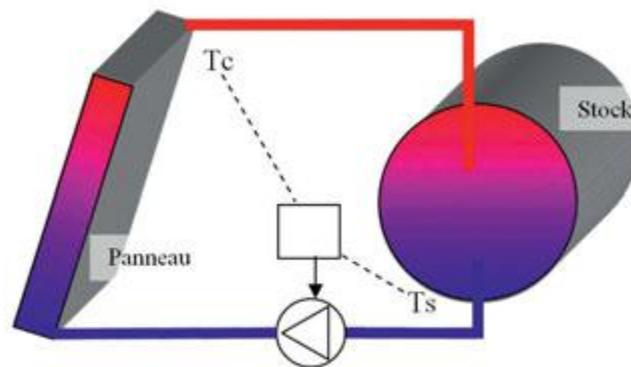


Figure III.11 : Rôle de la circulation dans un montage de base

Cet écart de température est appelé différence de température (DT).

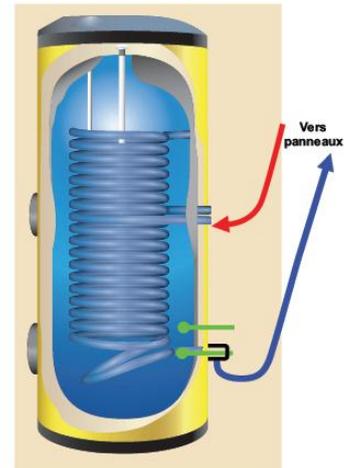
III.6.2 Régulation de base

Une régulation de base comprend deux entrées de température, une pour le stock une pour le capteur et une sortie permettant de commander la pompe. Lorsque la différence de température est suffisamment importante le relais se ferme et la pompe est mise en route. En fin de journée, le panneau reçoit moins d'énergie : l'écart de température entre l'entrée du panneau et la sortie diminue et la régulation stoppe la pompe Il est donc important de mesurer correctement la température pour que le système fonctionne efficacement. Nous allons voir à présent où placer les sondes

III.6.2.1 La sonde du ballon

La sonde du ballon doit être placée dans la partie basse du ballon, soit en contact direct avec le contenu, soit à l'intérieur de l'échangeur.

Lorsque la pompe est à l'arrêt, les deux solutions donnent la même température. Lorsqu'elle est en marche, la température du fluide qui entre effectivement dans le panneau est supérieure à celle de l'eau contenue dans le bas du ballon si l'échangeur n'est pas suffisamment efficace pour céder toutes ses calories à l'eau chaude sanitaire



III.6.2.2 La sonde des capteurs

La sonde des capteurs doit être placée en haut de ceux-ci, si possible près de la sortie de retour vers le stock. Elle est généralement en contact avec le fluide mais certains l'installent en contact avec l'absorbeur du panneau. Une dernière solution, mise en œuvre par certains constructeurs, consiste à implanter la sonde des capteurs de façon qu'elle mesure la température de l'air ambiant du panneau

III.6.3 Régulations évoluées

Lorsque les régulations deviennent moins basiques, elles peuvent proposer de multiples options.

Protection contre le gel : lorsque la température du capteur descend en dessous d'un seuil paramétrable (quelques degrés au-dessus de 0 °C), le circulateur est mis en fonction. Ainsi, en brassant le fluide du circuit primaire, on évite que le panneau gèle.

Gestion de l'énergie d'appoint : cette option permet de gérer la mise en route d'une résistance d'appoint pour chauffer l'eau chaude sanitaire lorsqu'elle est trop froide (absence de soleil, surconsommation, etc.).

Programmations périodiques : tout comme pour un réseau de chauffage classique (chauffage d'un cumulus électrique en heures creuses par exemple), il est possible de rendre certaines fonctionnalités périodiques et automatiques (températures de consigne jour/ nuit, mode été/hiver, etc.).

III.7 Système de distribution

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

III.7.1 Pertes de charge

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

$$Re = \frac{\rho \times U_m \times D}{\mu} \quad (\text{III.21})$$

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

$$\Delta p = 2f \times \frac{\rho \times (U_m)^2}{D} L \quad (\text{III.22})$$

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

$$m = \rho \times \dot{U}_m \times \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (\text{III.23})$$

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

$$P = m \times c_p \times \Delta T \quad (\text{III.24})$$

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

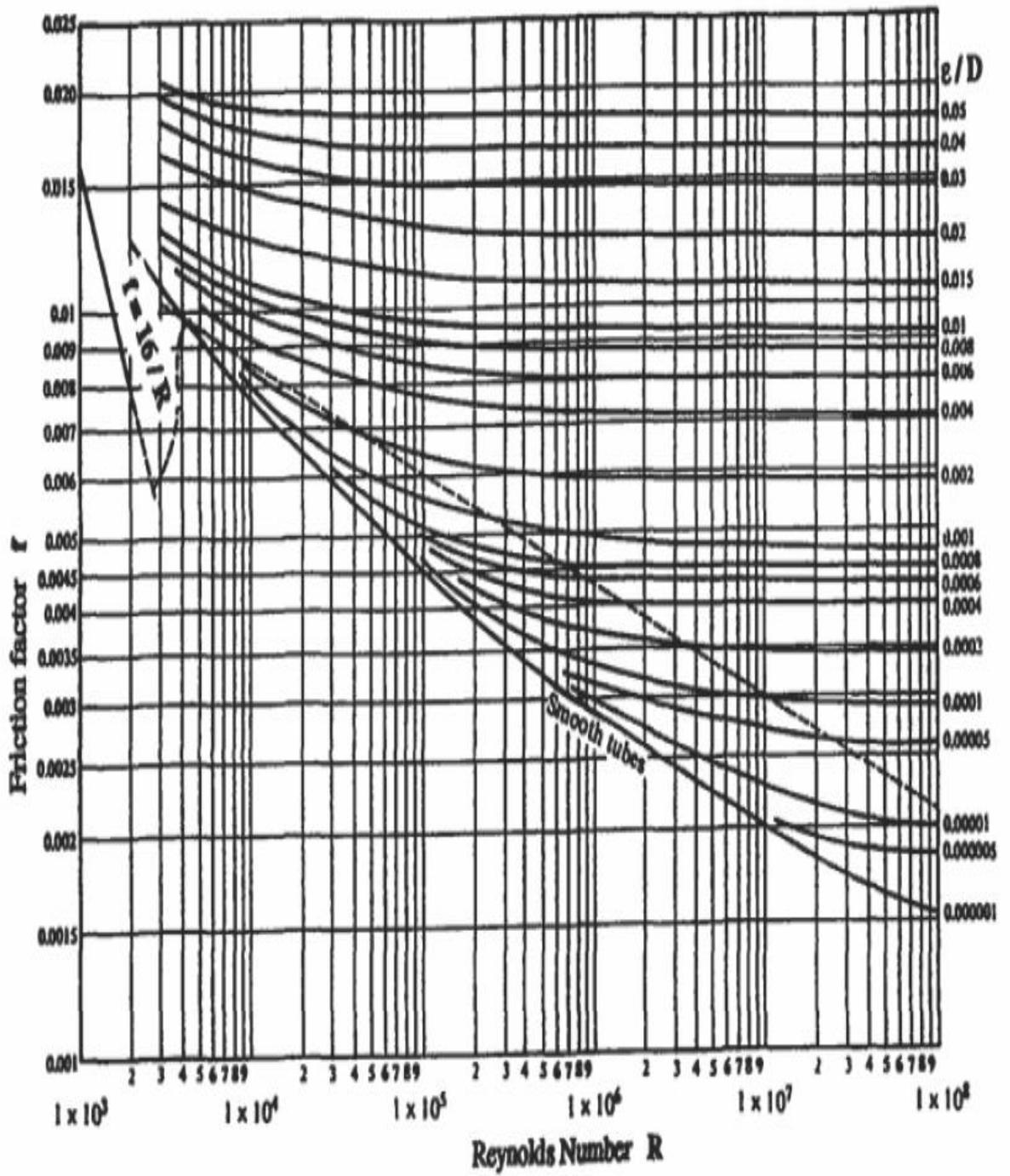


Figure III.12: Diagramme de Moody

III.7.2 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]:

$$D_i = 33.3 \times \left(\frac{Q}{(\rho.\pi)}\right)^{0.5} \quad (\text{III.25})$$

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.
- Les matériaux employés et les accessoire (joints, raccords...)
- 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 températures possible (pointes 140 °C et 110°C en continu) sur un circuit solaire [13].

III.7.3 Dimensionnement des vannes et robinets :

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.
- 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 réalisée en respectant les 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.

IV. Chapitre IV : DIMENSIONNEMENT

IV.1 Définitions

IV.1.1 Fraction solaire

La fraction solaire est le degré de couverture des besoins en eau chaude par l'énergie solaire. Cette fraction indique la relation entre la quantité d'énergie obtenue par le rayonnement solaire et la quantité d'énergie totale nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire.

IV.1.2 Rendement d'un chauffe-eau solaire

Le rendement d'un chauffe-eau solaire est le rapport entre la quantité d'énergie solaire utile captée et la quantité d'énergie solaire totale disponible, rapport calculé pour une période de référence donnée, généralement une année.

Quand on augmente la fraction solaire en augmentant la surface des capteurs, le rendement du système diminue. Le chauffe-eau solaire va travailler à une température moyenne plus élevée et le kWh de chaleur produite sera plus cher.

IV.2 Paramètres de dimensionnement

La taille d'un chauffe-eau solaire est fonction des paramètres, propres à chaque projet : la demande journalière en eau chaude sanitaire à couvrir (demande de base), et l'orientation et l'inclinaison des capteurs. Plus la consommation d'eau chaude plus la taille et donc le coût du chauffe-eau solaire seront importants.

IV.2.1 Demande journalière

La demande journalière de base en eau chaude sanitaire est définie comme la demande prise en compte pour le dimensionnement du chauffe-eau solaire. Cette demande est un paramètre difficile à déterminer, tant il est variable d'un ménage à l'autre, et d'une année à l'autre pour un même ménage vu l'évolution de la composition familiale.

IV.2.2 L'orientation et de l'inclinaison du capteur solaire

Le dernier paramètre affectant le dimensionnement est la position du capteur. Un capteur bien positionné par rapport à la course du soleil emmagasinera plus d'énergie, qu'un capteur mal positionné.

IV.3 Procédure de dimensionnement

La procédure de dimensionnement comporte les étapes suivantes :

- Evaluation de la demande de base
- L'orientation et l'inclinaison du capteur
- Détermination de la surface de capteurs
- Détermination du volume du ballon de stockage

IV.4 Application

Plusieurs variables environnementales doivent être calculées en fonction de données météorologiques fournies par l'utilisateur.

La moyenne mensuelle de l'ensoleillement quotidien dans le plan du capteur solaire, utilisée pour calculer le rendement du capteur solaire et l'énergie solaire captée. Toute étude ou application de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et détaillée du rayonnement solaire dans ce site.

La température de l'eau froide fournie par le réseau municipal, utilisée pour calculer la charge énergétique qui doit être assurée par le système.

L'installation de production d'eau chaude sanitaire (ECS) dans un collectif de 16 logements répartie sur quatre étages pour 96 habitants.

L'installation se situe dans la région de Batna qui a les données géographiques suivantes [14] :

Tableau IV.1:Les données géographiques

vile	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)	Albédo
Batna	35.8 N	6.3 E	826	0.25

Inclinaison du capteur	orientation	Température demandé	immeuble	Nombre habitant
35.8 °	0° (sud)	T=55 °C	Toiture terrasse 4 étages	96 personnes

IV.4.1 Estimation des rayonnements solaires globales sur un plan incliné

Nous avons établi un code de calcul qui a pour but de déterminer le rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée. Ce code de calcul est basé sur l'enchaînement des équations de chapitre (III), dont l'algorithme est résumé comme suit:

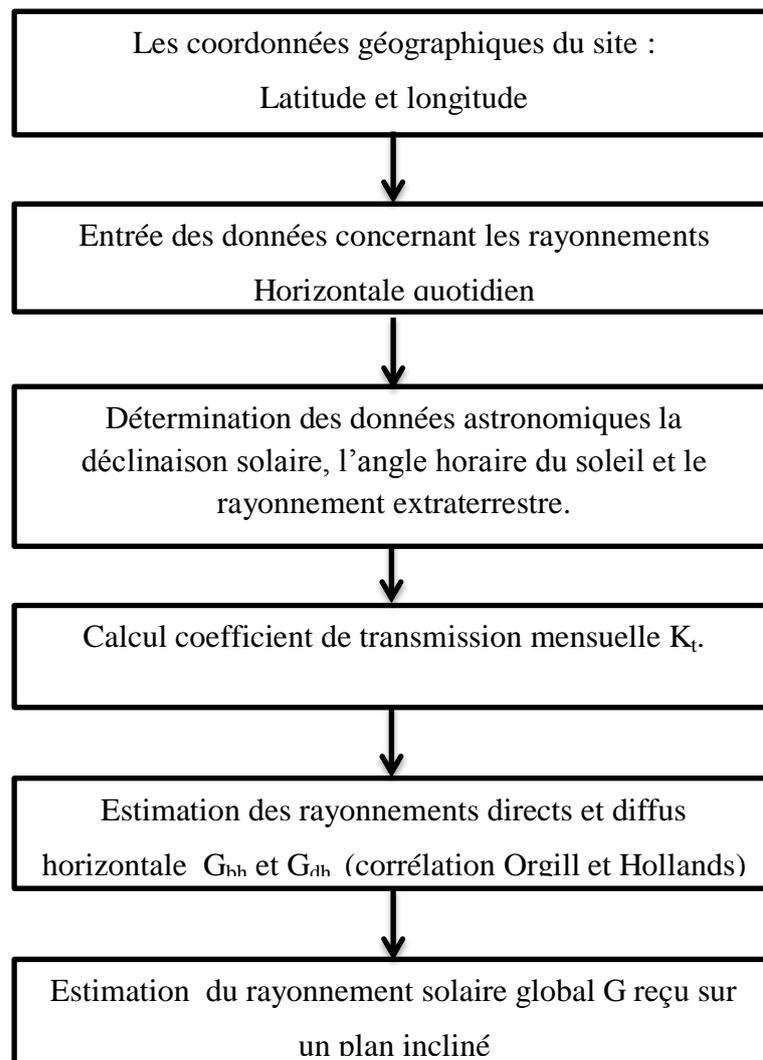


Figure IV.1: Organigramme de calcul du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée

On utilise le code de calcul et on obtient les résultats suivants :

Tableau IV.2 : Les rayonnements solaires reçus sur un plan incliné

Mois	G_h (MJ/m ²)	G_0 (MJ/m ²)	K_t	G_{dh} (MJ/m ²)	G_{bh} (MJ/m ²)	G (MJ/m ²)
Jan	9.00	17.82	0.505	5.65	3.34	11.95
Fevr	12.42	22.65	0.548	6.81	5.60	15.61
Mars	16.24	29.23	0.555	7.70	7.53	18.15
Avr	19.84	35.61	0.557	10.55	9.28	19.69
Mai	22.97	39.95	0.575	11.46	11.50	20.81
Jui	24.95	41.53	0.600	11.30	13.65	21.45
Juill	25.67	40.6	0.632	10.11	15.65	22.30
Aout	21.89	37.17	0.589	10.36	11.53	20.83
Sep	17.50	31.40	0.557	9.31	8.18	18.60
Oct	12.96	24.58	0.527	7.61	5.35	15.30
Nov	9.54	18.84	0.506	5.97	3.57	12.37
Déc	8.06	16.30	0.494	5.22	2.84	10.94

IV.4.2 Demande journalière

La demande moyenne en eau chaude sanitaire est par définition une valeur intermédiaire entre les journées à plus forte et à plus faible demande [15].

Tableau IV.3: La demande moyenne en eau chaude sanitaire

Type d'occupant	Consommation moyenne
Occupant économe en eau chaude	20 l/j/personne
Consommateur moyen	35 l/j/personne
Grand consommateur d'eau chaude	50 l/j/personne

La consommation moyenne pour un consommateur moyen d'eau chaude $V_j=35$ l/jour/personne. Alors, la consommation totale pour 96 personnes est de $V_t=3\ 360$ l/jour.

IV.4.3 Système 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.

IV.4.4 Système de captage

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/m² et ne croissent pratiquement pas au-delà de 100 l/m² ; on choisit la valeur du ratio R_a qui est définie comme étant le rapport entre la capacité de l'eau à chauffer par la surface totale de capteur, dans l'intervalle (75 l/m²- 100 l/m²). On prend une valeur intermédiaire dans nos calculs qui est $R_a = 85$ l/m² pour la région de Batna.

$$A_c = \frac{V}{R_a} = 47.05 \text{ m}^2 \quad (\text{IV.1})$$

IV.4.5 Estimation de la température d'eau froide T_f

Les températures d'eau froide sont importantes dans la détermination des besoins énergétiques liés à la production d'eau chaude sanitaire. Elles peuvent varier d'une station à l'autre et en fonction des saisons. Bien que facilement mesurable, ces informations ne sont pas toujours disponibles et il est pratique d'utiliser 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 [7] :

$$T_f = \frac{T_{a,mensuelle} + T_{a,annuelle}}{2} \quad (\text{IV.2})$$

ou

$T_{a,mensuelle}$:température ambiante mensuelle.

$T_{a,annuelle}$: température ambiante annuelle égale à 15.3 °C [14].

Tableau IV.4:Les températures mensuelles

Mois	T_a (°C)	T_f °C
Janv	5.2	10.25
Fevr	6.3	10.8
Mars	9.5	12.4
Avr	12.9	14.1
Mai	18.2	16.7
Juin	23.3	19.3
Juill	26.7	21
Aout	26.1	20.7
Sep	21.0	18.1
Oct	16.7	16
Nov	10.4	12.8
Déc	6.6	10.9

IV.4.6 Estimation des besoins

Les besoins d'énergie pour chauffer l'eau doivent être déterminés dans les modèles de production d'eau chaude sanitaire. Pour calculer les quantités d'énergie nécessaires à la production d'eau chaude sanitaire, il faut d'abord connaître les volumes d'eau chaude à produire.

La quantité réelle d'énergie nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire est calculée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée.

Si V est le volume d'eau chaude T_h la température demandée d'eau chaude, les deux étant spécifiées par l'utilisateur, alors la quantité d'énergie q_c nécessaire pour produire l'eau chaude est donnée par:

$$q_c = \rho * V * C_p * (T_h - T_f) \quad (III.3)$$

ρ : Masse volumique (1Kg/l)

C_p : la capacité calorifique de l'eau (4 200 (J/Kg)/°C)

V : volume d'eau chaude (l).

T_h : température eau chaude.

T_f : température eau froide

Tableau IV.5: Les besoin de chauffage d'eau

Mois	q _c (GJ)
Janv	23.30
Fevr	20.79
Mars	22.19
Avr	20.61
Mai	19.95
Juin	17.99
Juill	17.70
Aout	17.86
Sep	18.60
Oct	20.31
Nov	21.27
Dec	22.97

IV.4.7 Les pertes

IV.4.7.1 Les pertes du ballon de stockage

Le calcul des pertes mensuelles de la partie solaire du stockage solaire s'effectue de la façon suivante [14]:

$$q_b = UA * (T_s - T_a) * N \quad (\text{III.28})$$

$$UA = C_r * V \quad (\text{III.29})$$

On note que la méthode de calcul ne s'applique que si la constante de refroidissement du ballon est inférieure ou égale à la valeur par défaut du ballon d'eau chaude, c'est-à-dire :

$$C_r \leq 4.2 * V^{-0.45} \quad (\text{III.30})$$

Tableau IV.6:Les pertes mensuelles de stockage

Mois	Jan	Fevr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
q(GJ)	3.33	2.94	3.04	2.73	2.46	2.05	1.89	1.93	2.20	2.50	2.89	3.24

IV.5 Calcul de la fraction solaire

La fraction solaire est le degré de couverture des besoins en eau chaude par l'énergie solaire on peut le calculer par la méthode de f-Chart.

IV.5.1 Description de la 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 [11]. 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.

IV.5.1.1 Calcul des variables X et Y

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

$$X = \frac{A_c \times K \times (T_{ref} - T_a) \times \Delta t}{q_{ch}}$$
$$Y = \frac{A_c \times B \times G_i \times N}{q_{ch}}$$

Ou

G_i : rayonnement solaire globale reçu sur u plan incliné.

K : le coefficient de déperdition thermique de la boucle de captage

B : le facteur optique d'un capteur solaire

Ac : représente la surface des capteurs.

N : est le nombre de jours dans le mois.

Δt : le nombre de seconde dans le mois

q_{ch} : la charge totale de chauffage (J)

Tref : température de référence est égale à 100°C [11].

X doit être corrigé à la fois en fonction de la dimension du stockage et de la température de l'eau froide. La méthode f-Chart a été développée avec une capacité de stockage standard de 75 litres par m² de capteur solaire. Pour les autres capacités de stockage, X doit être multiplié par un facteur correctif X_c/X défini par :

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{volume reel de stockage}(V_r)}{\text{volume standard de stockage}(V_s)} \right)^{-0.25}$$

IV.5.1.2 Calcul de la 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 :

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

IV.5.1.3 Calcul du taux de recouvrement de la charge annuel :

Connaissant les besoins en chauffage L et l'apport solaire $f \cdot L$ on peut calculer la fraction annuelle de l'énergie solaire fournie à la charge de la manière suivante [11] :

$$F = \frac{\sum_1^{12} f \times L}{\sum_1^{12} L}$$

IV.5.2 Application la méthode de-Chart

D'après les résultats précédents et en appliqué la méthode de f-Chart, on obtient :

Tableau IV.7:Les résultats de la méthode de f Chart

Mois	G (MJ)	q_{ch} (GJ)	X	Y	f
Janv	11.95	26.63	2.12	0.46	0.28
Fevr	15.61	23.73	2.11	0.58	0.37
Mars	18.15	25.23	2.13	0.72	0.48

Avr	19.69	23.34	2.14	0.84	0.57
Mai	20.81	22.41	2.16	0.95	0.64
Juin	21.45	20.04	2.19	1.06	0.72
Juill	22.30	19.59	2.22	1.18	0.81
Aout	20.83	19.79	2.21	1.08	0.71
Sep	18.60	20.8	2.18	0.89	0.60
Oct	15.30	22.81	2.17	0.69	0.46
Nov	12.37	24.16	2.13	0.51	0.33
Dec	10.94	26.21	2.11	0.43	0.26

Taux de couverture $F=50\%$

IV.6 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 à installer le ballon d'appoint, alimenté par une énergie conventionnelle, en série avec le chauffe-eau solaire

Le dimensionnement de ballon d'appoint s'effectue par rapport au mois le plus chargé (décembre), le taux de recouvrement dans ce mois est de 0,26 ; donc le ballon d'appoint doit être dimensionné pour couvrir 74% des besoins.

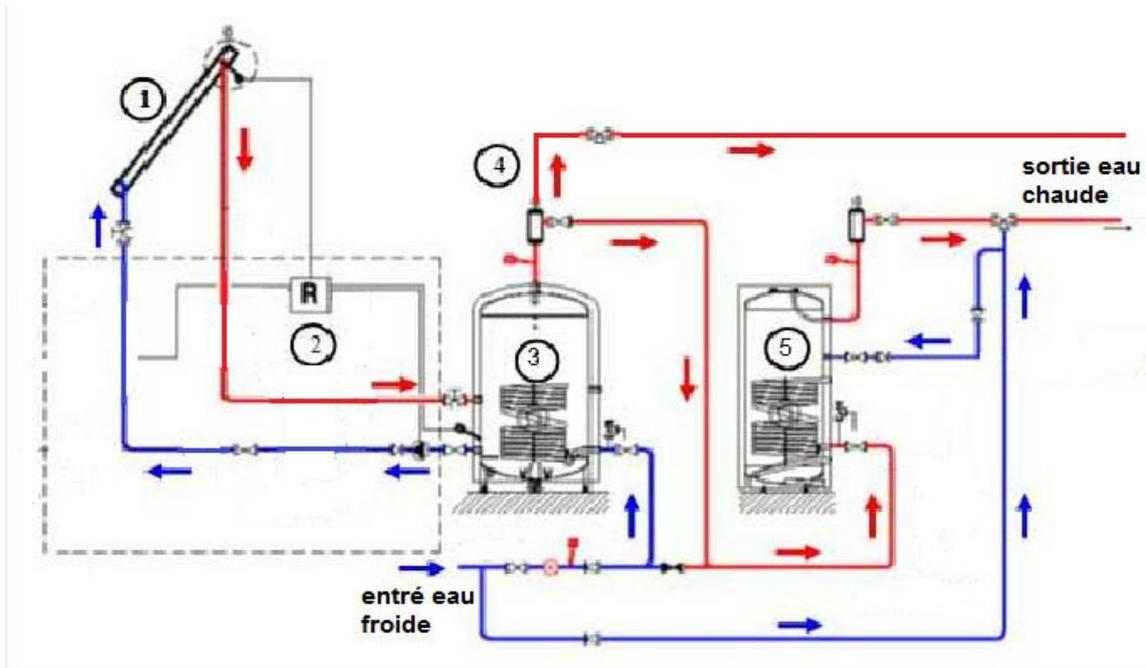


Figure IV.15 Schéma de principe d'une installation de production d'eau chaude sanitaire avec appoint

Le principe consiste à récupérer l'énergie solaire grâce à un fluide caloporteur qui circule dans les capteurs (1) 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 l'immeuble (4). dans le cas d'un faible ensoleillement, l'eau froide pousse du ballon solaire vers l'appoint (5). L'énergie d'appoint vient de compléter «la chauffe», si nécessaire, jusqu'à atteindre la température de consigne souhaitée, mais si la température atteint 55 °C l'eau chaude va se distribuer directement.

V. Analyse des Résultat

V.1 Rayonnement solaire reçu sur un plan incliné

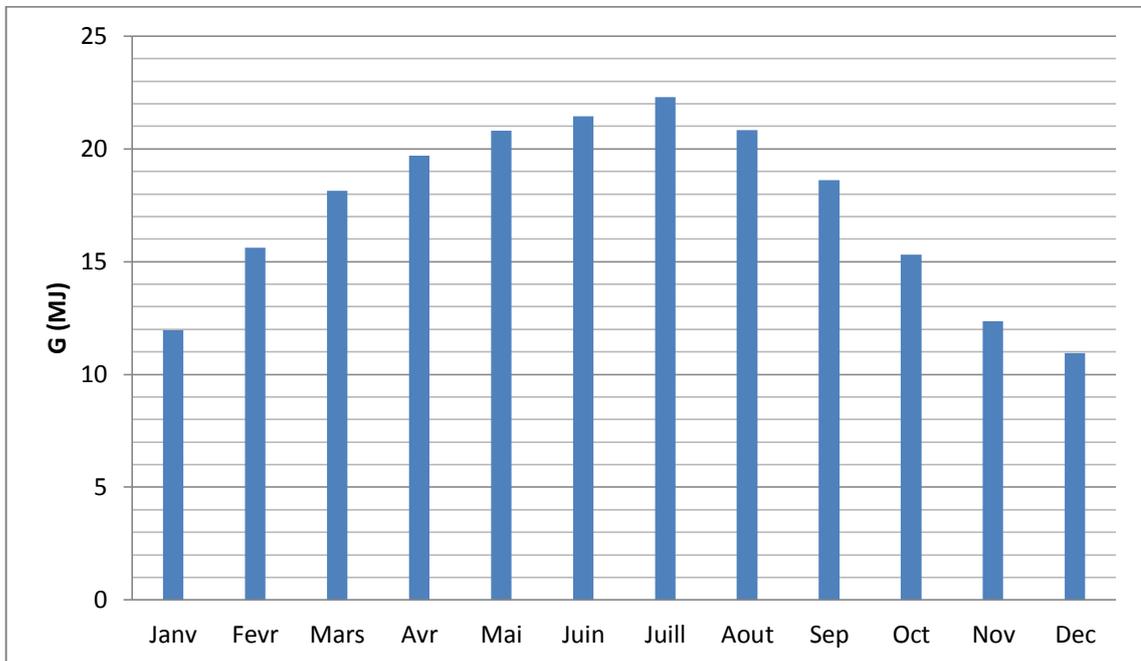
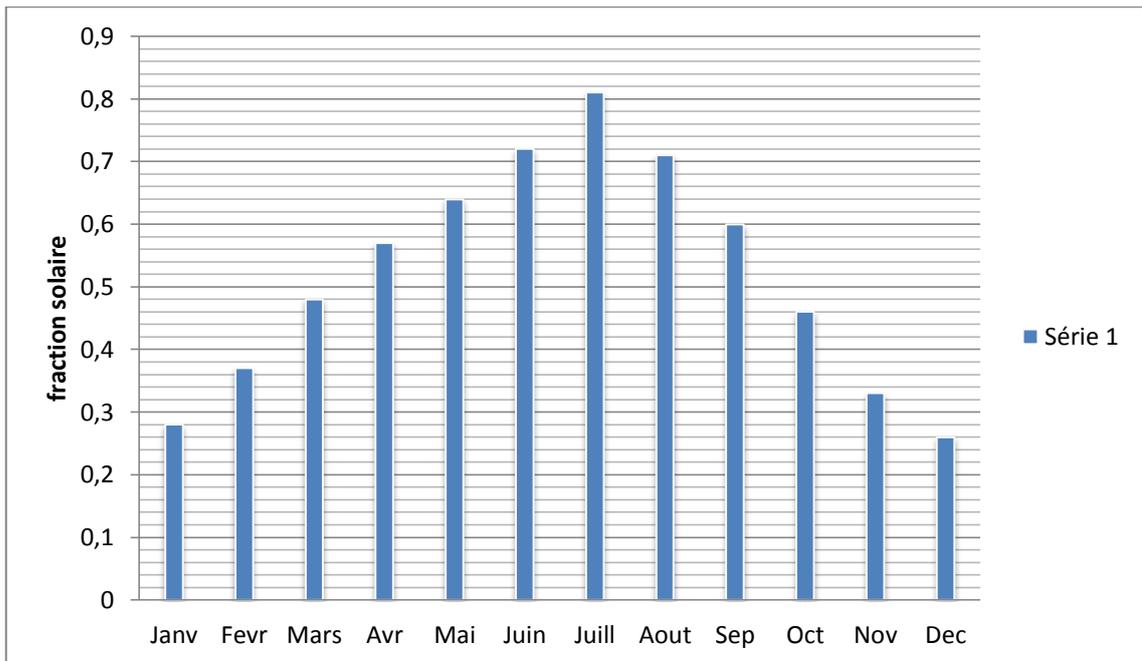


Figure V.1: Evolution des rayonnements solaires

Le graphique présente la variation de l'ensoleillement sur le plan d'un capteur incliné à 35.8° de la région de Batna.

V.2 Fraction solaire



Le graphique présente l'évolution de taux de couverture durant toute l'année pour la région de Batna (climat haut plateau), on remarque que l'installation assure plus de 80 % des besoins en été à cause de forte rayonnement solaire que l'on reçoit en été et la diminution des besoins d'eau chaude dans cet saison. En hiver énergie solaire couvre 25% du besoin d'eau chaude à cause de faible rayonnement solaire surtout dans le mois décembre.

CONCLUSION GENERALE

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 cout 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 de 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 de dimensionner une installation de chauffe-eau solaire collectif individualisé pour la région des haut plateaux, par le calcul du rayonnement global incident, et des calculs des besoins d'énergie pour le chauffage d'eau sanitaire et le dimensionnement du 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 55% par an d'énergie utilise pour le chauffage d'eau sanitaire ce que présente une importante économie en énergie primaire.

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

En pratique le taux de convertir nécessite un calcul économique plus précis, à la fois par les coûte des équipements et la fiabilité des statistique 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 assure par une installation d'appoint au gaz dimensionné pour satisfaite les besoins des mois les plus chargé.

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 région 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;
    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
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);

```