

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان -

Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté Pour L'obtention de Diplôme du Master

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté Par : **Azzouz Mahammed chamseddine**

Embarek Noureddine

Sujet :

Simulation d'un système solaire thermique destiné à une habitation

Soutenue devant le jury composé de :

Président :	SAIM Rachid	université de Tlemcen
Examineur :	ROSTANE Brahim	université de Tlemcen
Encadreur :	SARI HASSOUN Zakaria	université de Tlemcen
Co-encadreur :	ALIANE Khaled	université de Tlemcen

Année universitaire : 2020/2021



Remerciement

*Un grand merci à Dieu de nous avoir guidé vers le bon chemin de la lumière
Et de savoir.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Docteur **SARI HASSOUN Zakaria** et notre
Co-encadreur professeur **ALIANE Khaled**, pour leurs orientations éclairées, et leurs
aides pour élaborer notre projet.*

*Nous tenons à exprimer nos respectueuses gratitudees à Monsieur **SAIM Rachid**
Professeur à l'université de Tlemcen faculté de Technologie, qui nous
Donne le privilège de l'avoir comme président de jury.*

*Nos remerciements s'adressent également à Monsieur **ROSTANE Brahim** encadreur
Docteur à l'université de Tlemcen faculté de Technologie
D'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail et de faire partie du jury.*

*Enfin Nous remercions tous personnes de près ou de loin qui ont aidés à la réalisation
de ce travail.*

Dédicace

C'est avec la plus grande émotion et la plus grande joie que je dédie ce modeste travail à mes chers parents que ne cessent de s'sacrifier pour le bonheur de leur fils.

Je le dédié aussi

- ✓ *A mes frères.*
- ✓ *A mes chers amis.*
- ✓ *A mes collègues de la faculté de Abou bekr belkaid et en Particulier à ma promotion.*
- ✓ *A tous les professeurs qui m'ont assisté tout au long de Mon cursus.*
- ✓ *A tout la famille MADOURI*
- ✓ *Et à tous ceux et celles qui m'ont soutenu de près ou de L'oïnt, ceux et celles que j'aime et qui me sont chers*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

✓ *Mes parents, qui étaient toujours là pour moi dès mon enfance, grâce à eux que j'ai pu atteindre ce succès*

Que dieu les protégé

✓ *A mes chers frères et mes chers amis Zoheir Hebbar et Zakaria Fekih*

✓ *Et toute ma famille*

✓ *A tous mes amis et collègues sans exception*

sommaire

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie solaire

1.1	Introduction.....	3
1.2	Généralités sur le soleil :	3
1.2.1	Présentation :	3
1.2.2	Carte d'identité du soleil :	3
1.2.3	Constitution du soleil : [2].....	4
1.2.4	Rayonnement solaire :.....	6
1.2.5	Composante du rayonnement solaire :	6
1.2.6	La constante solaire I_0 :.....	7
1.2.7	Le rayonnement solaire au sol :	7
1.3	Rappels astronomiques :	8
1.3.1	Introduction :	8
1.4	Système équatorial :.....	8
1.4.1	La déclinaison du soleil notée (δ) :	8
1.4.2	L'angle horaire noté (w) :	9
1.5	Système horizontal :	10
1.5.1	L'azimut du soleil noté (a) :	10
1.5.2	La hauteur du soleil notée (h) :	10
1.5.3	Latitude du lieu \emptyset :	10
1.5.4	Angle d'incidence θ :	11
1.6	Description des différents capteurs :	11
1.6.1	Introduction :	11
1.6.2	Caractéristiques techniques des différents composants : [3]	12
1.6.3	Les couvertures :	13
1.6.4	Absorbeur :	14
1.6.5	Fluide caloporteur : [6].....	16
1.6.6	Isolant :	17

sommaire

1.7	Principe de l'effet de serre:.....	18
1.8	Bilan énergétique :.....	19
1.8.1	Introduction :.....	19
1.8.2	Hypothèses :.....	19
1.9	Paramètres de captage :	20
1.9.1	Paramètres externes :.....	20
1.9.2	Paramètres internes :	20
1.10	Organigramme de calcul :.....	21
1.10.1	Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement :.....	21
1.10.2	Réflexion des radiations :.....	21
1.10.3	Coefficient de transmission de vitre (τ) :	22
1.10.4	Effet des réflexions multiples :	22
1.10.5	Flux global reçu sur un plan horizontal :	23
1.11	Les capteurs solaires thermiques:.....	23
1.11.1	Introduction :.....	23
1.11.2	Définition : [8].....	23
1.11.3	Le principe de fonctionnement d'un capteur thermique : [9].....	24
1.12	Les types des capteurs solaires :.....	24
1.12.1	Les capteurs plans non vitrés dit " capteur moquette " : [10].....	24
1.12.2	Les capteurs plans avec vitrage : [11].....	25
1.12.3	Les capteurs sous vide : [12].....	25
1.12.4	Les capteurs solaires plans : [13].....	26
<i>Chapitre 2 : Chauffage solaire de l'habitat</i>		
2.1	Introduction : [14].....	28
2.2	La production directe de chaleur pour l'habitat:.....	28
2.2.1	Le chauffe-eau solaire : [14]	29
2.2.2	Le chauffage solaire des maisons : [15].....	30

sommaire

2.2.3	Le Mur Trombe-Michel: [16].....	30
2.3	Rudiments d'un système de chauffage solaire:	31
2.4	Systèmes de chauffage solaire passifs: [17]	32
2.5	Systèmes de chauffage solaire actifs: [17] [18].....	33
2.5.1	Système de chauffage solaire actif à eau /à air :	34
2.6	Système de capteurs solaires:.....	35
2.6.1	Installation des capteurs solaires: [19]	35
2.6.2	Protection contre le gel : [20].....	36
2.7	Système de stockage :.....	38
2.7.1	Le stockage sous forme de chaleur sensible :	40
2.7.2	Le stockage sous forme de chaleur latente : [26].....	41
2.7.3	Stockage journalier et stockage saisonnier : [27].....	42
2.8	Système de distribution : [28].....	44
2.9	Quelques caractéristiques climatiques du site de Tlemcen :	44
2.9.1	L'humidité relative :.....	44
2.9.2	Vitesse de l'air :.....	45
2.9.3	Température de l'air :.....	45
2.9.4	Adaptation de la ressource aux besoins :	46
2.10	Description de l'installation étudiée :.....	47
2.10.1	Principe de fonctionnement :	48
2.10.2	Système solaire :.....	48
2.10.3	Différents organes de sous système solaire :	48
2.10.4	Système de distribution :.....	51
2.11	Bilans énergétiques des sous-système :.....	51
2.11.1	Sous Système de captage solaire :.....	51
2.11.2	Sous Système de stockage :.....	51
2.12	Conclusion :	52

sommaire

Chapitre 3 : Simulation et interprétation

3.1	Introduction :	53
3.2	Présentation générale du logiciel T*SOL : [30]	53
3.3	Caractéristiques particulières des composants :	54
3.3.1	Le capteur solaire plan:	54
3.3.2	L'accumulateur sanitaire :	55
3.3.3	Le fluide caloporteur :	56
3.3.4	Rôle de ballon :	56
3.3.5	La pompe:	56
3.3.6	Chauffage appoint :	56
3.4	Les étapes de simulation de T*SOL :	57
3.5	Paramètres du système « deux réservoirs eau chaude sanitaire » :	57
3.5.1	Paramètres du capteur et le circuit solaire :	57
3.5.2	Le profil de la consommation :	59
3.5.3	Etude de l'installation solaire :	60
3.6	Dépouillement des résultats de la simulation :	61
3.6.1	Rayonnement global horizontale (Irradiation horizontale kWh/m ²) :.	61
3.6.2	Position du soleil (azimut) :	62
3.6.3	Débit volumique :	62
3.6.4	Taux de couverture ECS et la température ECS :	63
3.6.5	Energie fournie pour le chauffage d'eau sanitaire :	64
3.6.6	Energie système solaire pour l'ECS et le Besoins énergétique Réchauffement et la consommation de l'ECS:	64
3.6.7	Rayonnement global spécifique sur la surface inclinée et la température moyen de capteur :	65
3.6.8	Température maximale journalière dans le capteur :	66

sommaire

3.6.9	Pertes thermiques des capteurs et les pertes tuyauterie extérieur et intérieur :.....	66
3.6.10	Pertes thermiques des deux ballons ECS :	67
3.6.11	Emission de CO ₂ évitée :	67
3.6.12	Consommation de gaz naturel :	68
3.6.13	Economie de gaz naturel :	68
3.6.14	Rendement de système :	69
3.6.15	Résultat de variation de ballon :	69
3.7	Résultats de la simulation annuelle :	70
3.8	Schéma de bilan énergétique :	70
3.9	Conclusion :	71

Liste de figure

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie solaire

Figure 1.1 : La chromosphère vue en analyse spectrale H α	5
Figure 1.2 : Densité de la couronne solaire.....	5
Figure 1.3 : La longueur d'onde de rayonnement solaire	6
Figure 1.4 : Les composants du rayonnement solaire.....	8
Figure 1.5 : déclinaison du soleil	9
Figure 1.6: les coordonnées horaires.....	9
Figure 1.7: Les coordonnées horizontales.....	10
Figure 1.8 : Angle d'incidence du rayonnement sur un plan d'orientation quelconque.....	11
Figure 1.9 : différents composants de capteur plan	12
Figure 1.10 : schéma d'un capteur plan	12
Figure 1.11: principe de l'effet de serre	18
Figure 1.12: Comportement du rayonnement thermique.	22
Figure 1.13: Principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique.....	24
Figure 1.14: Capteurs solaires sans vitrage (capteur moquette)	25
Figure 1.15: Composants types d'un capteur plan avec vitrage	25
Figure 1.16: Capteurs solaire sous vide	26
Figure 1. 17: Principe de fonctionnement du capteur solaire plan	26

Chapitre 2 : Chauffage solaire de l'habitat

Figure 2.1 : Modèle du fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.....	29
Figure 2.2 : Schéma d'une installation destinée pour le chauffage des maisons	30
Figure 2.3 : Le mur Trombe-Michel	31
Figure 2.4: Système solaire passif.....	33

Liste de figure

Figure 2.5: Système d'énergie solaire à eau en boucle fermée	34
Figure 2.6 : Système de chauffage solaire à air avec stockage à lit de pierres ...	35
Figure 2.7 : système "Drainback"	37
Figure 2.8 : Cycle de stockage	39
Figure 2. 9 : Changement d'état présenté dans un diagramme température-enthalpie	42
Figure 2.10 : Description schématique du procédé de stockage inter-saisonnier d'énergie solaire	43
Figure 2.11: Variation mensuelle de l'humidité relative (%) du site de Tlemcen	45
Figure 2. 12 : Déphasage entre ressources et besoins pour le site de Tlemcen ..	47
Figure 2. 13 : Structure du système de chauffage global et les sous systèmes ...	48
Figure 2.14: Capteur solaire plan à eau vitré	49
Figure 2.15: Réservoir de stockage d'eau chaude.....	50

Chapitre 3 : Simulation et interprétation

Figure 3.1 : Schéma d'un capteur solaire plan.....	55
Figure 3. 2: Schéma d'un accumulateur sanitaire	55
Figure 3.3: distance minimale des capteurs	58
Figure 3.4: Allure annuelle de la consommation ECS.....	60
Figure 3. 5: Installation ECS (2ballons).....	61
Figure 3.6: Irradiation horizontale	61
Figure 3.7: position du soleil (azimut)	62
Figure 3.8: débit volumique	62
Figure 3.9 : Taux de couverture ECS et la température ECS	63
Figure 3.10 : Energie fournie pour le chauffage d'eau sanitaire.....	64

Liste de figure

Figure 3.11: diagramme de l'énergie solaire ECS et la consommation d'ECS et et le Besoins énergétique réchauffement	64
Figure 3.12 : Rayonnement global spécifique sur la surface inclinée et la température moyen de capteur	65
Figure 3.13 : Température maximale journalière dans le capteur	66
Figure 3.14 : Pertes thermiques des capteurs et les pertes tuyauterie extérieur et intérieur.....	66
Figure 3.15 : Pertes thermiques des deux ballons ECS.....	67
Figure 3.16 : Emission de CO2 évitée	67
Figure 3.17: consommation de gaz naturel	68
Figure 3.18 : Economie de gaz naturel.....	68
Figure 3.19 : Rendement de système	69
Figure 3.20 : Résultat de variation de ballon	69
Figure 3. 21 : schéma de bilan énergétique	70

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie solaire

Table 1.1: Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible et de l'infrarouge [4].....	14
Table 1. 2 : Conductivité thermique λ des différents absorbeurs [4].....	15
Table 1.3 : Absorption, réflectivité et émissivité des différentes couleurs de surface [5].....	16
Table 1.4: conductivité thermique de quelques matériaux [7].....	17

Chapitre 2 : Chauffage solaire de l'habitat

Table 2.1: Propriétés thermo physiques de quelques matériaux pour le stockage par chaleur sensible, (Pincemin, 2007). [9].....	41
Table 2.2: Température de confort de la période de chauffage pour Tlemcen[28].....	46

Résumé

Le sujet porte sur le choix d'un système solaire thermique destiné à chauffer une habitation et à produire de l'eau chaude sanitaire. L'étude concerne en premier lieu une partie théorique sur les différents capteurs solaires thermiques. En deuxième lieu, on étudiera les composantes de ce système à savoir le capteur solaire et les différentes combinaisons de raccordement en série ou en parallèle, le ballon d'eau chaude en passant par une étude préalable des déperditions thermiques. Les grandeurs instantanées de l'ensoleillement et des différentes températures et flux thermiques seront estimés par la suite (journalier, mensuelle ou saisonnière suivant l'état de l'avancement). Une étude écologique peut-être entamé si le déroulement des travaux ne prend pas de retard.

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

Abstract

The subject relates to the choice of a solar thermal system intended to heat a home and produce domestic hot water. The study primarily concerns a theoretical part on the various solar thermal collectors. Secondly, the components of this system will be studied, namely the solar collector and the various combinations of connection in series or in parallel, the hot water tank, going through a preliminary study of heat losses. The instantaneous magnitudes of the sunshine and the various temperatures and heat flows will be estimated subsequently (daily, monthly or seasonal depending on the state of progress). An ecological study can be started if the progress of the work does not take delay.

keywords: producing hot water, solar heating, solar thermal collector

تلخيص

يتعلق الموضوع باختيار نظام حراري شمسي يهدف إلى تدفئة المنزل وإنتاج الماء الساخن المنزلي. تتعلق الدراسة في المقام الأول بالجزء النظري حول المجمعات الحرارية الشمسية المختلفة. ثانيًا، ستتم دراسة مكونات هذا النظام، وهي مجمع الطاقة الشمسية والتركيبات المختلفة للوصلات المتسلسلة أو بالتوازي، خزان الماء الساخن، الذي يمر بدراسة أولية لفقد الحرارة. سيتم تقدير المقادير اللحظية لأشعة الشمس ودرجات الحرارة المختلفة وتدفقات

الحرارة لاحقًا (يوميًا أو شهريًا أو موسميًا حسب حالة التقدم). يمكن بدء دراسة بيئية إذا لم يتأخر تقدم العمل
الكلمات المفتاحية: إنتاج المياه الساخنة، التدفئة الشمسية، لاقط شمسي حراري

Nomenclature

A_r	surface du réservoir	[m ²]
a	Azimut du soleil	[degré]
C_p	Chaleur spécifique de l'air	[J/kg.°C]
D	Rayonnement diffus : Plan horizontal	[W/m ²]
D^*	Rayonnement diffus : Plan incliné	[W/m ²]
G	Rayonnement globale : Plan horizontal	[W/m ²]
G^*	Rayonnement globale : Plan incliné	[W/m ²]
H	Hauteur du soleil	[degré]
h	Coefficient de convection	[W/m ² °C]
I_0	Constante solaire	[W/m ²]
I_{0n}	La variation de I_0 en fonction de l'année	[W/m ²]
I	Rayonnement direct : Plan horizontal	[W/m ²]
I_c	Intensité des radiations solaires dans le plan du capteur	[W/m ²]
I	Inclinaison du capteur	[degré]
m_f	Débit du fluide	[kg/s]
n	Quantième jour de l'année	-----
Q_u	Chaleur utilisé	[j/kg.C]
Q_r	Chaleur convective de réservoir vers l'ambient	[j/kg.C]
Q_r	Taux de perte thermiques	[W]
R	Rayonnement diffus du sol	[W/m ²]
S	Rayonnement direct : Plan incliné	[W/m ²]
T_a	Température de l'ambiance	[°C]
T_{ab}	Température de l'absorbeur	[°C]
T_r	Température de réservoir	[°C]
T_{ap}	Température d'appoint	[°C]

Nomenclature

T_u	Température utile	[°C]
T_{2f}	Température de sortie du réservoir	[°C]
T_{1f}	Température d'entrée de réservoir	[°C]
U	Coefficient global de perte thermique du capteur	[W/m ² °C]
W	L'angle horaire	[degré]

Lettres grecques :

δ	La déclinaison du soleil	[degré]
ϕ	La latitude du lieu	[degré]
θ	l'angle incident	[degré]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
ρ	La réflectivité	[%]
α	L'absorptivité	[%]
τ	La transmissivité	[%]
ε_v	L'émissivité de la vitre	[%]
ρ	Masse volumique	[Kg/ m ³]
τ	Coefficient de transmission de la vitre	[%]
α	Coefficient d'absorption pour le rayonnement solaire	[%]



Introduction
Générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie continue d'augmenter. L'épuisement des ressources énergétiques fossiles et le réchauffement climatique ont incité les pays à mettre en œuvre des politiques de développement durable et de protection de l'environnement. La part la plus importante de l'énergie consommée est l'énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) Une utilisation intensive entraînera l'épuisement de ces réserves de ressources et portera atteinte à l'environnement. Cette menace se manifeste principalement par la pollution et le réchauffement climatique. La plus grande préoccupation dans le monde aujourd'hui est de réduire cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie traditionnelles à des normes très strictes et en développant d'autres alternatives qui se concentrent sur différentes formes d'énergies renouvelables. Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement lors des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis ont connu une période de récession après le contre-choc de 1986, puis ont repris vie après la signature du protocole de Kyoto en 1998. Dispositions particulières. Par rapport à 1990, les émissions de gaz à effet de serre des pays riches ont diminué de 5,2 % de 2002 à 2012. L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus utilisées dans le monde. Le soleil libère chaque jour l'équivalent de 100 milliards de TEP (tonne d'équivalent pétrole) en énergie. Cette valeur est à comparer avec les 9,58 milliards de TEP que représente la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire (1998). Le développement de l'énergie solaire est dans notre intérêt car elle est sans pollution et sans énergie. On dit aussi 100 % énergie verte. Car sa production n'émet pas directement de dioxyde de carbone. Son système d'exploitation comporte deux parties importantes :

- L'un concerne la conversion directe de l'énergie solaire en électricité, à savoir le secteur électrique (conversion photovoltaïque).
- L'autre consiste à convertir l'énergie solaire en énergie thermique directement utilisable (chauffage domestique, distillation solaire, chauffage de piscine, séchage solaire, etc.), ou la convertir en énergie mécanique ou en énergie électrique dans un deuxième temps.

La situation géographique de l'Algérie est propice au développement et à la prospérité de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, compte tenu de l'intensité du rayonnement

Introduction générale

Reçu et de l'importance de plus de dix heures d'ensoleillement par jour pendant plusieurs mois, mon pays peut répondre à une partie de la demande grâce à l'énergie solaire.

Ces avantages peuvent être récompensés. Les zones les plus reculées, en particulier les endroits à très forte consommation d'énergie dans les applications de climatisation.

Cependant, il existe plusieurs obstacles et difficultés qui rendent difficile le contrôle et l'utilisation de cette énergie, dont le plus important est que le rayonnement solaire est intermittent et incontrôlé pendant la journée et les saisons de l'année. En fait, l'énergie solaire dépend toujours de De plus, il y a un déphasage entre la demande d'énergie (chaleur) et la contribution de la production d'énergie solaire. Compte tenu de cette indisponibilité, il est toujours nécessaire de fournir de l'énergie supplémentaire pour chaque utilisation. Les systèmes solaires nécessitent généralement une assistance énergétique. Notre travail s'intéresse à l'énergie thermique de l'énergie solaire, qui convertit l'énergie solaire en chaleur à basse température. Les capteurs plans utilisent l'absorption surfacique sélective et l'effet de serre produit par le verre, et sont généralement utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire et chauffer la maison.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres :

Au premier chapitre :

Ce chapitre présente les connaissances de base nécessaires à la compréhension du sujet. Nous allons d'abord discuter de quelques concepts sur l'énergie Représenter le soleil pour décrire différents types de capteurs Panneaux solaires, en particulier les capteurs plats et divers composants Composition et ses paramètres et caractéristiques de fonctionnement et Enfin le chapitre se termine par le bilan thermique des capteurs solaires.

Le deuxième chapitre :

Nous avons montré des systèmes de chauffage et de climatisation domestiques Nous avons proposé un système de chauffage combiné, puis nous avons eu Affiche chaque sous-système, ainsi que la climatisation et équipement.

Au troisième chapitre :

Dans ce chapitre, nous montrons les résultats de la simulation Discussion et interprétation des résultats du chauffage de l'eau sanitaire.



Chapitre 1 :
Généralités sur
l'énergie solaire

1.1 Introduction

L'énergie solaire est la plus répandue de toutes les énergies renouvelables, et c'est l'une des énergies les plus facilement exploitables. Comme la plupart des énergies douces, il donne à l'utilisateur la possibilité d'en bénéficier directement.

Connaître la position du soleil dans le ciel à tout moment et n'importe où est nécessaire pour étudier l'énergie d'interception, connaître les heures de lever et de coucher du soleil en plus de la trajectoire du soleil dans le ciel pendant la journée et la capacité d'évaluer certaines quantités de celui-ci comme la durée maximale du soleil et le rayonnement global [1].

1.2 Généralités sur le soleil :

1.2.1 Présentation :

Le soleil a une forme sphérique qui est constitué d'hydrogène (71%), d'hélium (27%), et d'autres éléments, plus lourds (2%). Au centre du soleil, la température atteint environ 16 millions de degrés Celsius, en surface la température du soleil est d'environ 5900 K, c'est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre, Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} W.

Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques, 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère

1.2.2 Carte d'identité du soleil :

L'étude astrophysique du soleil conduit aux valeurs suivantes :

- Masse : $2 \cdot 10^{30}$ kg ,soit 333432 fois celle de la terre.
- Rayon : $7 \cdot 10^8$ m, soit 109 fois celui de la terre.
- Densité du soleil : 1400 kg/m^3
- Age de soleil: $4.7 \cdot 10^9$ années.
- Puissance rayonnée par le soleil : $4 \cdot 10^{23}$ kw.

- Distance moyenne (d) à la terre : $149.6 \cdot 10^9$ m.

1.2.3 Constitution du soleil : [2]

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul près de 99,9 % de la masse du système solaire. Sa forme est sphérique presque parfaite et la planéité polaire est estimée à 9 parties par million, ce qui signifie que son diamètre polaire n'est que de dix kilomètres plus petit que le diamètre équatorial. Contrairement aux objets sur Terre, le soleil n'a pas de limites extérieures clairement définies : à mesure qu'il s'éloigne de son centre, sa densité de gaz diminue à peu près de façon exponentielle. Par contre, sa structure interne est très claire, et le rayon du soleil se mesure de son centre à la photosphère. Le soleil est une sphère hétérogène, dans laquelle on distingue 3 zones principales : l'intérieur, la photosphère, la chromosphère et la couronne.

- L'intérieur :

C'est la source d'énergie du soleil, il est composé de 2/3 d'hydrogène et 1/3 d'hélium. La température atteint de l'astre $15 \cdot 10^6$ K.

- La photosphère :

C'est la surface visible du Soleil. Ce n'est pas une surface solide, mais le lieu où les propriétés du milieu changent radicalement. A ce niveau, la matière du Soleil, opaque à l'intérieur, devient transparente. Les « bulles » de matière de la zone convective éclatent à la surface et forment les granules. On y observe en lumière blanche les taches solaires, entre autres phénomènes.

- Chromosphère :

Elle est située juste au-dessus de la photosphère. Son épaisseur est faible, 8 000 km. Elle est plus chaude que la photosphère. Contrairement à la photosphère qui fournit un spectre d'absorption, la chromosphère, visible en bord du Soleil, a un spectre d'émission dans lequel domine la raie H α . C'est la raison pour laquelle elle apparaît en rose/rouge lors des éclipses de Soleil. La chromosphère émet elle-même un rayonnement. Cette émission est le fait des spicules, sorte de petits jets longilignes de matière de 300 à 1 000 km de diamètre, et de 10 à 15 000 km de hauteur. Leur durée de vie est de l'ordre de 5 minutes. La vitesse des jets atteint 30 km/s. On observe les spicules sur le bord du Soleil,

elles se détachent sur un fond plus sombre. Elles seraient liées aux ondes de choc sonores qui crèvent par endroit la surface.

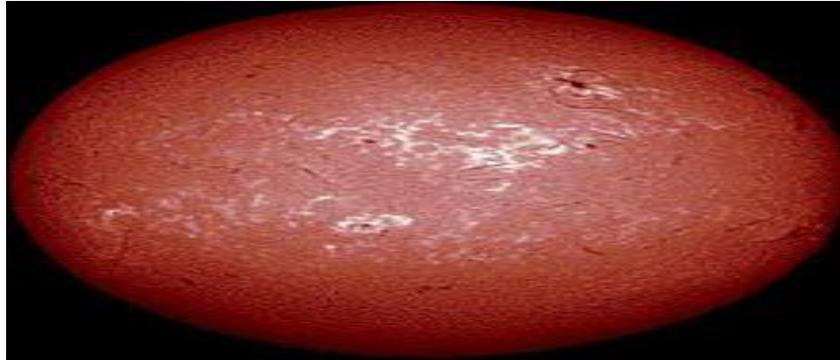


Figure 1.1 : La chromosphère vue en analyse spectrale H α .

- La couronne :

La couronne solaire est composée à 73 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium. Les températures sont de l'ordre du million de degrés.

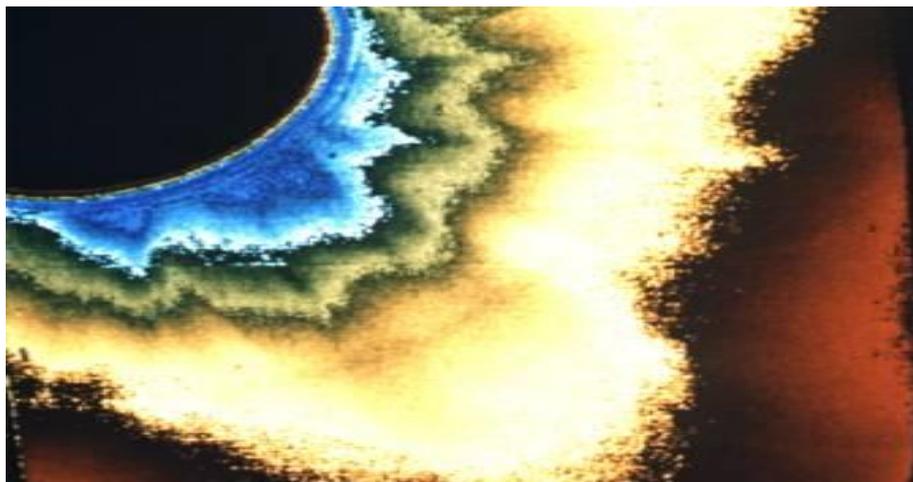


Figure 1.2 : Densité de la couronne solaire

1.2.4 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire, souvent appelé la ressource solaire ou simplement la lumière du soleil, est un terme général désignant le rayonnement électromagnétique émis par le soleil. Le rayonnement solaire peut être capté et transformé en formes d'énergie utiles, telles que la chaleur et l'électricité, à l'aide de diverses technologies. Cependant, la faisabilité technique et le fonctionnement économique de ces technologies à un endroit spécifique dépendent de la ressource solaire disponible

1.2.5 Composante du rayonnement solaire :

Bien que la distance entre le soleil et la terre soit de 150,106 kilomètres, la couche terrestre reçoit 180,106 gigawatts d'énergie, c'est pourquoi l'énergie solaire est utilisée comme substitut à d'autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique, avec des longueurs allant de 0,22 à 10 microns. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose grossièrement comme suit : % bande de lumière visible (0,4 à 0,8 μm), 44% bande infrarouge (> à 0,8 μm). Chaque couleur est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au-delà du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra-violet)

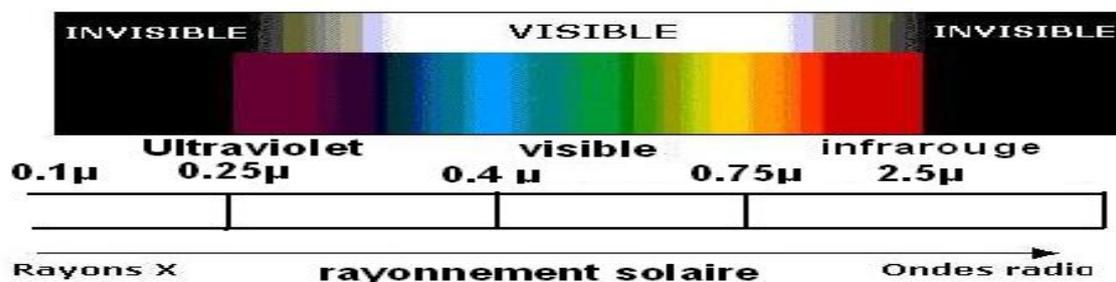


Figure 1.3 : La longueur d'onde de rayonnement solaire

1.2.6 La constante solaire I_0 :

La valeur du rayonnement solaire " I_c ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m^{-2} et fluctue d'environ 0,2 % tous les trente ans, et la variation de I_0 en fonction de l'année entre 1308-1400 W/ m^2 . En première approximation, on peut calculer la valeur de " I_c " en fonction du numéro du jour de l'année " n " par la relation suivante [3] :

$$I_c = I_0 \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(360 \cdot \frac{n}{365} \right) \right) \quad [1.1]$$

n : quantième de l'année

I_0 : constante solaire sa valeur est de 1400 w/m^2 .

1.2.7 Le rayonnement solaire au sol :

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus Figure I.4 L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

A : Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

B : Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation

géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

C: Rayonnement global :

Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et direct.

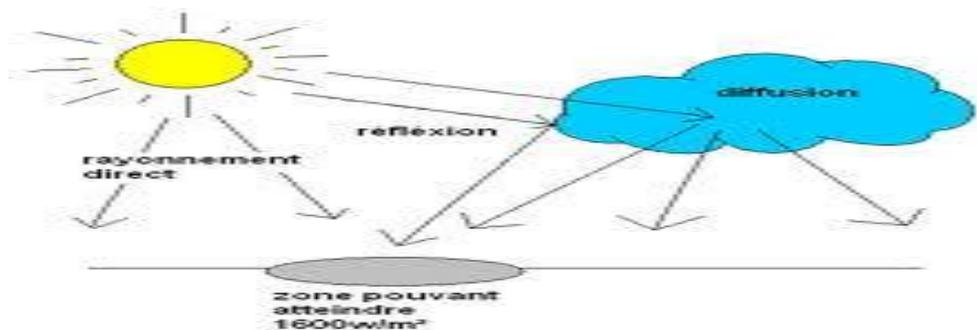


Figure 1.4 : Les composants du rayonnement solaire

1.3 Rappels astronomiques :

1.3.1 Introduction :

La connaissance des mouvements relatifs de la terre et du soleil est nécessaire pour connaître le flux solaire reçu sur la surface de la terre en un lieu quelconque et un instant quelconque de la journée ou l'année.

1.4 Système équatorial :

1.4.1 La déclinaison du soleil notée (δ) :

δ : c'est l'angle qui fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours, donc elle maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre). δ est donnée par la relation suivante

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(284+n)}{365}\right) \quad [1.2]$$

D'où n : quantième jour de l'année $1 \leq n \leq 365$

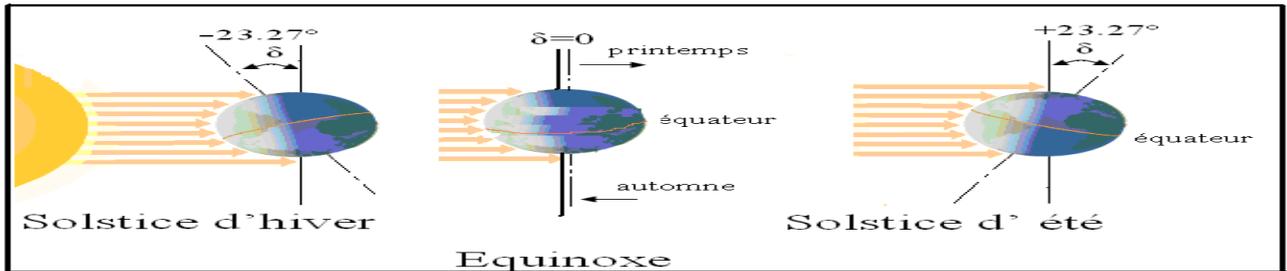


Figure 1.5 : déclinaison du soleil

1.4.2 L'angle horaire noté (w) :

C'est l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu où c'est le déplacement angulaire du soleil à l'est ou l'ouest du méridien local dû à la rotation de la terre autour de son axe par 15° par heure ($15^\circ/h$) donné par l'expression suivante :

$$w = \frac{360}{24} (TSV - 12) \quad [1.3]$$

TSV : temps solaire vrai donné en heures. Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.

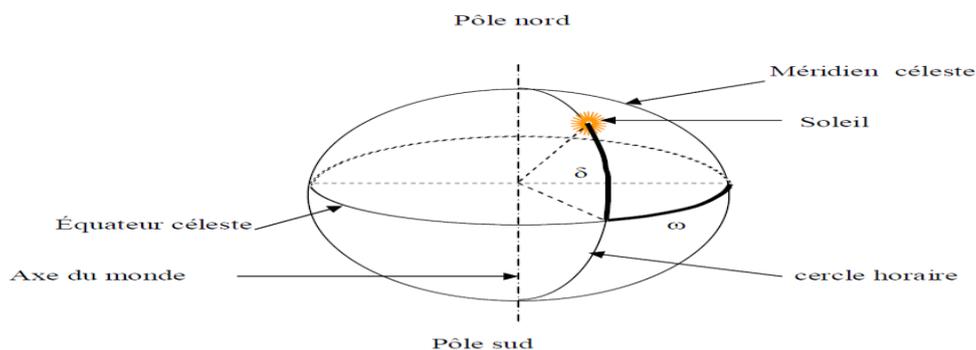


Figure 1.6: les coordonnées horaires

1.5 Système horizontal :

1.5.1 L'azimut du soleil noté (a) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad [1.4]$$

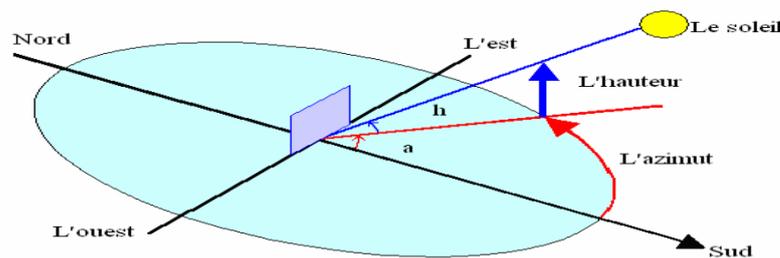


Figure 1.7: Les coordonnées horizontales

1.5.2 La hauteur du soleil notée (h) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai

On définit aussi l'angle zénithal noté « θ_z » qui est l'angle que fait la direction du soleil avec le vertical au lieu.

$$\sin h = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos w \quad [1.5] \quad \theta_z = 90^\circ - h$$

1.5.3 Latitude du lieu \emptyset :

C'est l'angle entre la position que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Les angles h et a peuvent être calculés à partir de la latitude du lieu \emptyset , de la déclinaison δ et l'angle horaire H ou w.

$$\sin h = \sin \emptyset \cdot \sin \delta + \cos \emptyset \cdot \cos \delta \cdot \cos w \quad [1.6]$$

$$\sin a = \cos \delta \frac{\sin w}{\cos h} \quad [1.7]$$

1.5.4 Angle d'incidence θ :

L'angle d'incidence représente l'angle compris entre la normale au plan du capteur et la radiation solaire.

θ est donné par la relation suivante :

$$\cos \theta = \sin \delta . \sin \varphi . \cos i + \cos \delta . \cos i . \cos \omega + \cos \delta . \sin i . \sin \gamma . \sin \omega - \sin \delta . \cos \varphi . \sin i . \cos \gamma + \cos \delta . \sin \varphi . \sin i . \cos \gamma . \cos \omega \quad [1.8]$$

Avec :

i : inclinaison du capteur.

γ : angle entre le méridien local et la projection de la normale au plan.

Cas particuliers :

- Surface horizontale $i = 0$, $\gamma = 0$, $\theta_i = \theta_z$
- Surface orientée vers le sud $\gamma = 0$

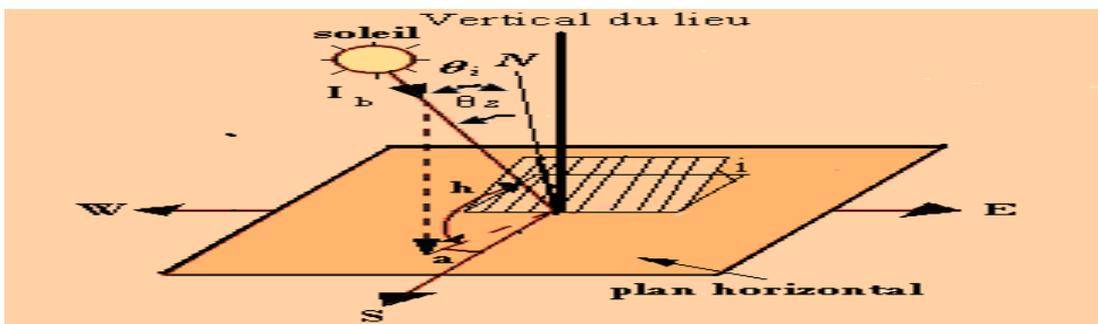


Figure 1.8 : Angle d'incidence du rayonnement sur un plan d'orientation quelconque

1.6 Description des différents capteurs :

1.6.1 Introduction :

Le capteur solaire appelé aussi panneau solaire est un appareil prévu pour absorber des rayons du soleil pour les transformer en énergie solaire. Pour faciliter sa pose et la capture du flux solaire, le capteur solaire se présente le plus souvent sous la forme d'un panneau plat, d'une surface moyenne de 1 m².

Le principe de ce capteur solaire est basé sur la réalisation de l'effet de serre, Pour cela on utilise une couverture plus ou moins transparente au rayonnement infrarouge, et le

corps noir qui absorbe parfaitement toutes les radiations quelle que soit leur longueur d'onde. Pour améliorer leur rendement on utilise : (une isolation thermique à l'arrière et sur les côtes, double vitrage, un bon choix de matériaux au niveau de l'absorbeur et couverture)

1.6.2 Caractéristiques techniques des différents composants : [3]

1. Cadre
2. Scellement étanche
3. Vitrage
4. Paroi latérale
5. Isolant thermique
6. Absorbeur plan
7. Tuyauterie (liquide caloporteur)
8. Profilé d'arrimage
9. Paroi inférieure

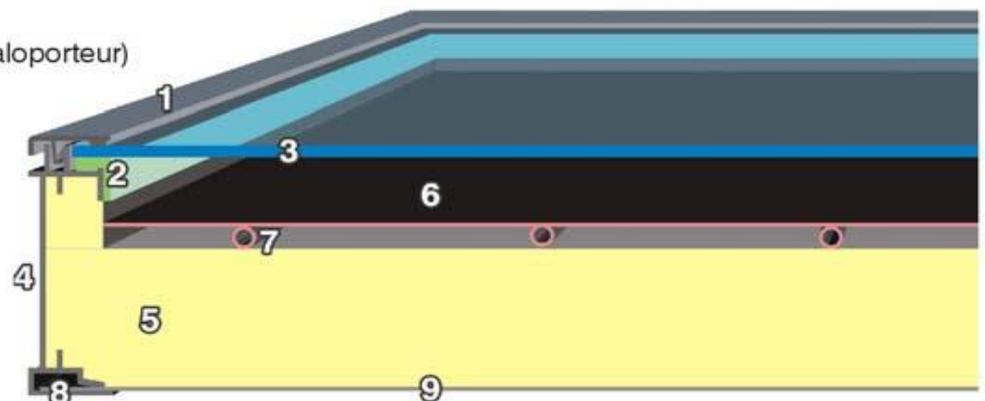


Figure 1.9 : différents composants de capteur plan

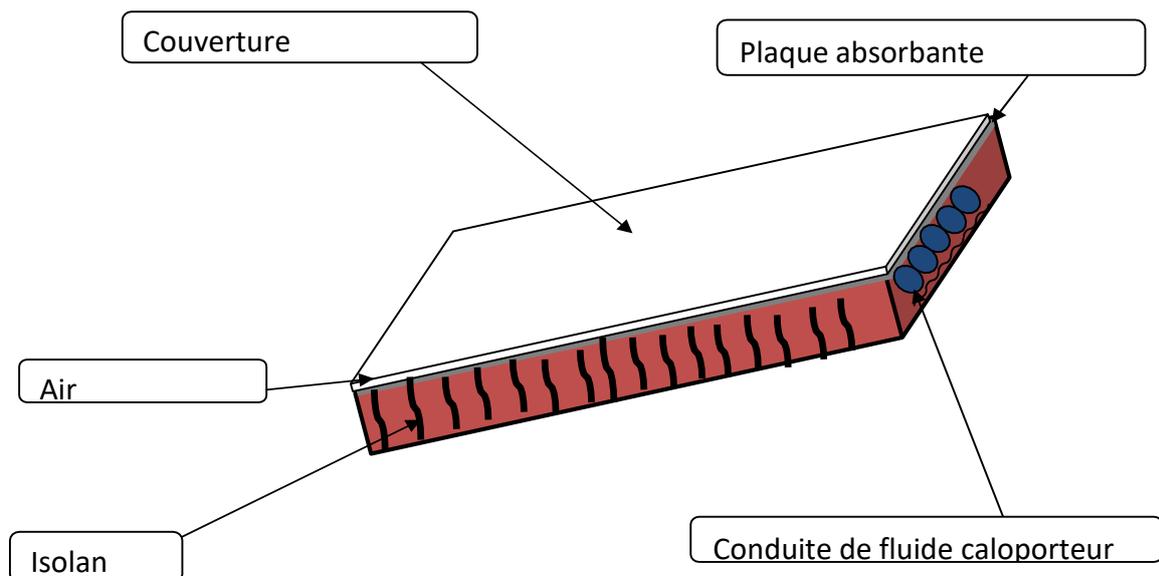


Figure 1.10 : schéma d'un capteur plan

1.6.3 Les couvertures :

Les couvertures permettent de réduire sensiblement les fuites thermiques convectives et radiatives par les faces du capteur, son utilisation s'impose lorsque la température de fonctionnement est élevée par rapport à la température ambiante, Le double vitrage est recommandé lorsque les températures de fonctionnement dépassent les 70°C.

On distingue deux types de couvertures transparentes :

a) Le verre :

Une telle couverture permet de 84% à 92% de luminosité solaire sous une incidence normale, pour une couche de verre de 3 mm d'épaisseur, la transmission du verre à la luminosité du soleil, finit par s'adapter à l'harmonie de ce matériau oxyde de fer (Fe_2O_3), qui absorbe la luminosité de grandes longueurs d'onde de la lumière du soleil, et tourne 1 tranche de cristaux verts. Les expressions indiquent que c'est pour les faibles quantités dans Fe_2O_3 , où la séquence de 92% devrait recevoir de bonnes valeurs de transmission.

• Les inconvénients du verre :

Les inconvénients qu'on peut avoir par rapport à l'utilisation du verre comme emballage alimentaire ne sont pas nombreux : le coût d'achat est élevé et il est cassable ce qui rend son transport un peu délicat.

b) Polycarbonates :

Le polycarbonate est un matériau plastique composé de plaques transparentes superposées. Ce plastique possède la principale caractéristique d'être extrêmement résistant, difficilement déformable et difficilement inflammable. Le polycarbonate est aussi résistant aux UV, plus léger que le verre, il possède des facultés isolantes, réputé pour optimiser la consommation énergétique intérieure. De plus, conserve sa résistance aux chocs à froid comme à chaud, allant jusqu'à des températures à 100 °C, leur coefficient de transmission au rayonnement solaire est de l'ordre de 83 % sous une incidence normale à l'état neuf qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans).

Matériaux	Transmissivité à incidence normale	
	$\lambda = 0,4-2,5 \mu\text{m}$	$\lambda = 2,5-4,0 \mu\text{m}$
Le verre	0.83-0.91	0.00-0.03
Les plastiques en feuilles	0.76-0.92	0.02-0.06
Les plastiques en films	0.85-0.87	0.2-0.26

Table 1.1: Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible et de l'infrarouge [4]

1.6.4 Absorbeur :

L'absorbeur est le cœur du capteur solaire, une surface composée d'un corps noir à trois fonctions :

- Absorber le rayonnement solaire.
- Le transformer en chaleur.
- Transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

De nombreuses études sont en cours pour améliorer la puissance de l'absorption du rayonnement solaire en appliquant à la surface d'aspiration. L'absorbeur idéal serait celui qui absorberait toute l'énergie correspondante au spectre solaire de longueur d'onde λ inférieure à $3\mu\text{m}$, et qui émettrait faiblement dans l'infrarouge lointain ($\lambda > 3\mu\text{m}$).

Le choix d'un absorbeur revient à l'analyse de :

- Facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible.
- Bonne conductivité thermique.
- Faible inertie thermique.

Une surface plane raisonnablement positionnée suffit pour absorber autant d'énergie rayonnée que possible (étude de l'inclinaison et de l'orientation); cette surface doit avoir le coefficient d'absorption le plus élevé possible de la couche superficielle.

Les matériaux utilisés sont :

- **Le cuivre** : les absorbeurs couramment utilisés actuellement sont constitués de tubes en cuivre ou inox, soudés sur une feuille d'aluminium.

Ils ne présentent presque jamais de trace de corrosion, même après 20 ans. On trouve deux types :

- Les absorbeurs faits de feuilles d'aluminium plaquées de cuivre.
- Les absorbeurs en tube de cuivre, soudés sur des feuilles de cuivre ou d'aluminium.
- **L'aluminium** : ces absorbeurs avaient l'inconvénient d'être sensible à la corrosion avec certains fluides caloporteurs mal dosés (antigel corrosif). On trouvait deux types :

- Les absorbeurs « roll-bond », constitués de deux feuilles d'aluminium d'abord recouvertes d'un enduit reproduisant le réseau de canaux. Fortement pressées ensemble, puis soudées, les deux feuilles étaient soumises à un gonflage haute pression.
- Les absorbeurs aluminium à caloduc avec échangeur de chaleur en acier inoxydable.

• **Les matières plastiques :**

Ils ont l'avantage d'être plus légers que les métaux et d'être plus résistants à la corrosion.

Parmi les plastiques, on distingue:

Polypropylène, polyphényloxyde (p.o.p) avec une résistance jusqu'à 150 ° malgré sa conductivité thermique 1500 fois inférieure à celle du cuivre.

Matériaux	Température en °C	Cal/s.°C.cm ²
Aluminium	100	0.49
	200	0.55
Cuivre « Copperson »	20	0.934
	100	0.908
	200	0.890
Magnésium	100	0.370

Table 1. 2 : Conductivité thermique λ des différents absorbeurs [4]

Couleur	A	P	E	α/ε
Peinture blanche	0.2	0.8	0.91	0.22
Peinture verte	0.5	0.5	0.9	0.56
Peinture noire	0.96	0.04	0.9	1.00

Table 1.3 : Absorption, réflectivité et émissivité des différentes couleurs de surface [5]

1.6.5 Fluide caloporteur : [6]

Un fluide caloporteur (aussi appelé caloripporteur), est un fluide ayant la capacité particulière de capturer efficacement et durablement la chaleur ambiante. Il est donc utilisé dans différents systèmes (moteurs, chauffe-eau solaires, réfrigérateurs, etc.) pour transporter d'un point à un autre de la chaleur, en vue de produire un certain effet. Pour nous, il aura pour rôle de transporter la chaleur accumulée à l'intérieur des capteurs solaires (situés sur le "panneau") jusqu'au ballon d'eau chaude, afin de transmettre la chaleur à l'eau. Eau qui servira au chauffage par radiateurs ou à l'Eau Chaude Sanitaire.

Les conditions essentielles du choix d'un fluide caloporteur sont les suivantes :

- Faible viscosité.
- Haut point d'ébullition et bas point de congélation.
- Coefficient de transfert thermique élevé.
- Stabilité physique et chimique dans les conditions d'emploi et de stockage.
- Une grande capacité calorifique.

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.

1.6.6 Isolant :

L'isolant thermique permet de limiter les déperditions thermiques, sa caractéristique est le coefficient de conductivité; plus il est faible meilleur est l'isolant.

Un bon isolant doit avoir les quantités suivantes :

- Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- Une faible conductivité thermique.
- La chaleur massique doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de services.

Désignation	λ (w/m °K)	ρ (Kg/m ³)	Température maxi d'utilisation	Observation
Laine de verre	0.034 à 0.053	70	150	Sensible à l'humidité
Mousse de verre	0.057	123	150	Sensible à l'humidité
Bois	0.13 à 0.4	123	150	
Liège exposé	0.045	100		
Polystyrène	0.042	15	85	Moulé comprimé
Polyuréthane	0.035	35	85	Moulé comprimé

Table 1.4: conductivité thermique de quelques matériaux [7]

1.7 Principe de l'effet de serre:

L'effet de serre consiste à emprisonner l'énergie apportée par le rayonnement solaire avec le minimum de pertes. Pour cela, on place au-dessus d'un absorbeur peint en noir mât une couverture transparente au rayonnement solaire et opaque au rayonnement infrarouge. Le rayonnement solaire traverse la couverture transparente et vient frapper la surface de l'absorbeur qui s'échauffe. Celui-ci émet vers l'extérieur un rayonnement thermique dans l'infrarouge ($\lambda > 4 \mu\text{m}$). La vitre opaque à ce rayonnement va l'absorber et émettre à son tour vers l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture transparente : c'est l'effet de serre.

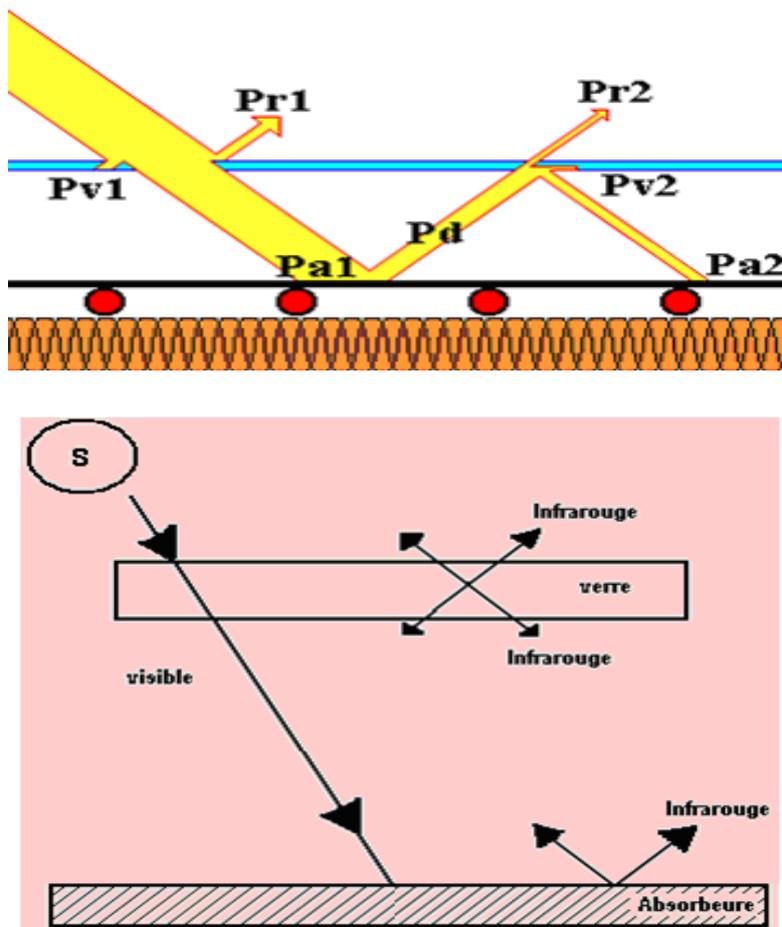


Figure 1.11: principe de l'effet de serre

Le rayonnement solaire Figure I.11, symbolisé par les flèches jaunes, ne traverse pas entièrement le vitrage du capteur car une petite partie (Pr1) est réfléchié par la vitre, surtout si l'angle d'incidence est fort. Malgré l'excellente transparence du verre, une petite partie (Pv1) de l'énergie reçue sera absorbée par le verre. Du rayonnement reçu par l'absorbeur, une partie (Pd) sera ré-rayonnée ou communiquée à l'air ambiant par convection. Une partie (Pr2) de Pd va traverser la vitre et sera perdue définitivement, une autre partie (Pv2) sera absorbée par la vitre et le reste retournera vers l'absorbeur (Pa2). On négligera les pertes au travers de l'isolant.

1.8 Bilan énergétique :

1.8.1 Introduction :

L'étude du bilan énergétique a pour objectif principal de minimiser les pertes thermiques afin d'augmenter leur efficacité:

1. Agir contre les pertes par rayonnement :
 - Absorbeur sélectif à haute absorption et faible émissivité
2. Agir contre les pertes par conduction :
 - Isolation des parois latérales et arrière du capteur
 - Vitrage à l'avant avec isolation transparente, mais attention à ne pas Augmenter les pertes optiques
 - Circulation de l'eau optimale pour extraire les calories de l'absorbeur
3. Agir contre les pertes par convection
 - Vitrage à l'avant.
 - Faire le vide autour de l'absorbeur « capteurs tubulaires sous vide Réduire les pertes optiques ».
 - Vitrage à haute transmissive.
 - Pas de vitrage « mais alors pertes thermiques dans le cas d'un capteur non vitré. » [4].

1.8.2 Hypothèses :

- Le régime est permanent.
- La construction du capteur est uniforme.

- La température ambiante autour du capteur est uniforme.
- L'écoulement est unidimensionnel dans la tuyère.
- Les échanges thermiques entre le capteur et le milieu ambiant sont :
 - ❖ Echanges conductifs entre :
 - L'absorbeur et le tube de fluide caloporteur.
 - Le tube et l'isolant.
 - L'absorbeur et l'isolant.
 - ❖ Echanges convectifs entre :
 - La vitre et l'air ambiant.
 - L'isolant et l'air ambiant.
 - Le fluide caloporteur et le tube.
 - L'absorbeur et la lame d'air.
 - ❖ Echanges radiatifs entre :
 - La vitre et le sol.
 - La vitre et la plaque.
 - La plaque et l'isolant.

1.9 Paramètres de captage :

1.9.1 Paramètres externes :

- Paramètre d'ensoleillement : éclairement énergétique du rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation.
- Température extérieure.
- Vitesse du vent.

1.9.2 Paramètres internes :

A. Paramètres géométriques :

- Paramètres de position : inclinaison, orientation du capteur.
- Dimension des différentes parties : épaisseur, longueur, largeur.
- Section de passage du fluide caloporteur.

B. Paramètres de fonctionnement

- Température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur.

- Débit de fluide caloporteur.
- Température de différentes parties du capteur.

1.10 Organigramme de calcul :

1.10.1 Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement :

On définit le comportement d'un corps par trois coefficients :

$$\bullet \quad \rho: \text{coefficient de réflexion} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie incidente}} \quad [1.9]$$

$$\bullet \quad \alpha: \text{coefficient d'absorption} = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}} \quad [1.10]$$

$$\bullet \quad \tau: \text{coefficient de transmission} = \frac{\text{énergie transmise}}{\text{énergie incidente}} \quad [1.11]$$

On pourra remarquer que pour tous les corps :

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad [1.12]$$

Cas particulier :

$\rho = 1$: Miroir parfait

$\tau = 1$: Transparent parfait

$\alpha = 1$: Corps noir parfait

Remarque :

En fait, aucun corps réel ne ressemble à ces cas particuliers, en fait tous les corps voyant les trois coefficients varient en fonction de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence du rayonnement incident.

1.10.2 Réflexion des radiations :

Soit n_1 et n_2 les indices de réfraction de deux milieux. Un rayon frappant l'interface avec un angle d'incidence θ_i , sera partiellement réfracté, les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction sont liés par la loi de Descartes.

$$n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad [1.13]$$

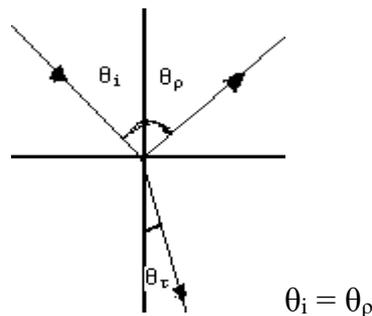


Figure 1.12: Comportement du rayonnement thermique.

La réflectivité monochromatique directionnelle hémisphérique est donnée par les formules de Fresnel, soit :

- Pour une onde polarisée parallèlement au plan d'incidence.
- Pour une onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence.

La réflectivité est donnée par :

Énergie réfléchie, énergie incidente.

Énergie absorbée, énergie transmise.

1.10.3 Coefficient de transmission de vitre (τ) :

Pour ce coefficient, il faut tenir compte des pertes optiques par réflexion et absorption des radiations solaires au niveau de la vitre. Il en résulte deux coefficients de transmission, l'un dû à la réflexion des rayonnements, l'autre à l'absorption.

La transmissivité totale de la vitre sera égale au produit de ces deux coefficients :

- Coefficient de transmission dû à la réflexion des rayonnements
- Coefficient de transmission dû à l'absorption des rayonnements

1.10.4 Effet des réflexions multiples :

- Le flux incident sur la surface du capteur.
- Coefficient de réflexion hémisphérique du vitrage.
- Facteur de transmission hémisphérique du vitrage.
- Coefficient de réflexion de l'absorbeur.
- Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

- Le flux incident sur la surface du capteur va se décomposer en :
 - Le flux transmis et arrivant à la surface de l'absorbeur.
 - Le flux réfléchi par l'absorbeur vers la vitre.
 - Le flux réfléchi par la vitre vers l'absorbeur.

1.10.5 Flux global reçu sur un plan horizontal :

Flux direct reçu sur une surface horizontale.

L'expression du bilan énergétique du capteur est :

$$I_a = Q_u + Q_1 + Q_s \quad [1.14]$$

Avec :

I_a : Flux solaire absorbé par la surface de l'absorbeur.

Q_u : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

Q_1 : puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur.

Q_s : puissance stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

1.11 Les capteurs solaires thermiques:

1.11.1 Introduction :

Les systèmes solaires actifs utilisent des capteurs pour convertir le rayonnement solaire en chaleur afin de produire de l'eau chaude, de dessaler, de sécher ou de cuire les aliments. Dans les systèmes solaires actifs, nous distinguons les capteurs solaires plans et les capteurs à concentration. Les systèmes solaires passifs se définissent comme toute technique qui permet de réduire les besoins de chauffage et climatisation grâce à une conception adéquate du bâtiment sans recourir aux systèmes conventionnels.

1.11.2 Définition : [8]

Le panneau solaire thermique est un dispositif récupérant l'énergie de la lumière solaire pour la transformer en chaleur, transmise à un fluide caloporteur, par exemple de l'eau (cas le plus fréquent pour les panneaux vendus dans le commerce, qui lui ajoutent un antigel) ou de l'air.

1.11.3 Le principe de fonctionnement d'un capteur thermique : [9]

Le capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie en provenance du soleil, sous forme de chaleur (rayonnement), et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est récupérée grâce à un fluide (composé d'eau et d'antigel ou d'air) caloporteur, qui s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage. Celui-ci laisse pénétrer la lumière solaire et minimise les pertes par rayonnement infrarouge de l'absorbeur en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage permet en outre de limiter les échanges de chaleur avec l'atmosphère. Le capteur solaire sera d'autant plus performant que le revêtement de l'absorbeur aura un coefficient d'absorption élevé et un coefficient d'émission faible. Les matériaux qui présentent ces caractéristiques sont dits "sélectifs".

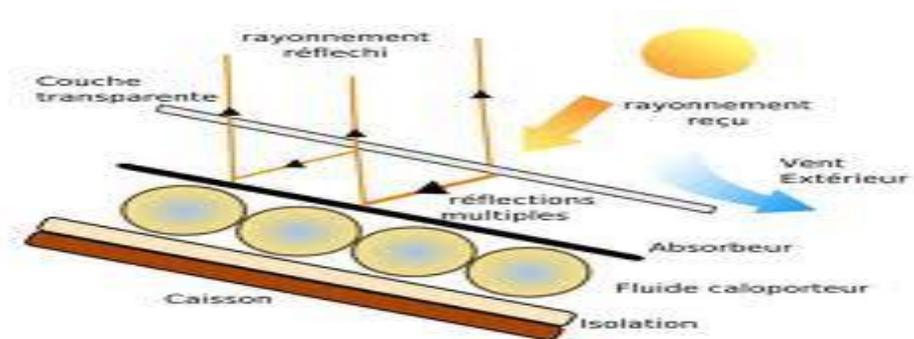


Figure 1.13: Principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique

1.12 Les types des capteurs solaires :

Il existe trois types de panneaux solaires thermiques :

1.12.1 Les capteurs plans non vitrés dit " capteur moquette " : [10]

Un capteur solaire non vitré, appelé aussi capteur "moquette", est composé :

- D'un absorbeur (métallique ou synthétique) revêtu d'une peinture sombre et sélective,
- D'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de la température. Les tubes sont parcourus par de l'eau (fluide caloporteur) qui se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes. Ces capteurs solaires ne sont généralement pas isolés. De ce fait, en sortie du capteur, l'eau n'excède pas 20°C.



Figure 1.14: Capteurs solaires sans vitrage (capteur moquette)

1.12.2 Les capteurs plans avec vitrage : [11]

Ils sont constitués d'une plaque en métal noir absorbant le rayonnement solaire et mise en contact avec les tubes contenant le fluide caloporteur. Un isolant résistant aux fortes températures est placé sous le tout pour garder la chaleur dans les tubes. Un vitrage en verre trempé recouvre les tubes pour les protéger et crée un effet de serre pour chauffer encore plus le fluide caloporteur.

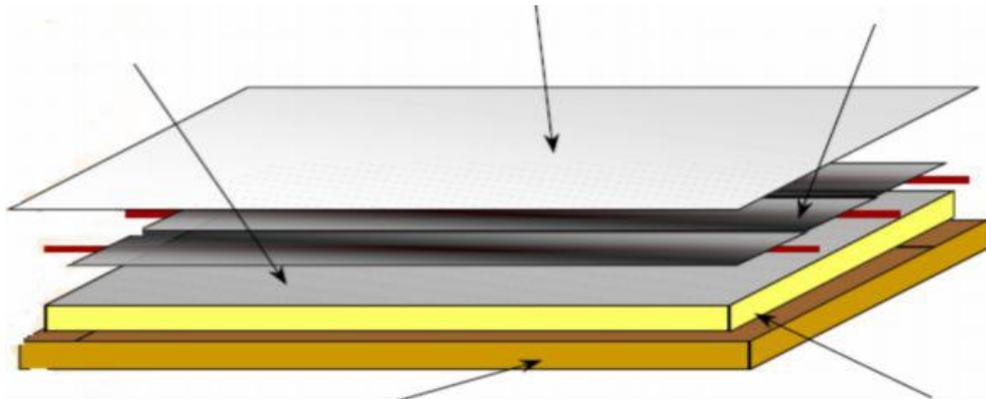


Figure 1.15: Composants types d'un capteur plan avec vitrage

1.12.3 Les capteurs sous vide : [12]

Le capteur solaire à tube sous vide est constitué d'un ensemble de tubes cylindriques. Les tubes sont formés par un absorbeur sélectif, situé sur un tamis à réflecteur et entouré d'un cylindre de verre transparent.

Le vide a été créé entre le tube externe transparent et l'absorbeur interne. Ainsi, les pertes thermodynamiques par conduction et par convection de la surface absorbante sont évitées, ce qui permet d'atteindre

Des températures supérieures à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et d'attirer beaucoup plus de rayons solaires.



Figure 1.16: Capteurs solaire sous vide

1.12.4 Les capteurs solaires plans : [13]

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique. Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (Figure 1.17).

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

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

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

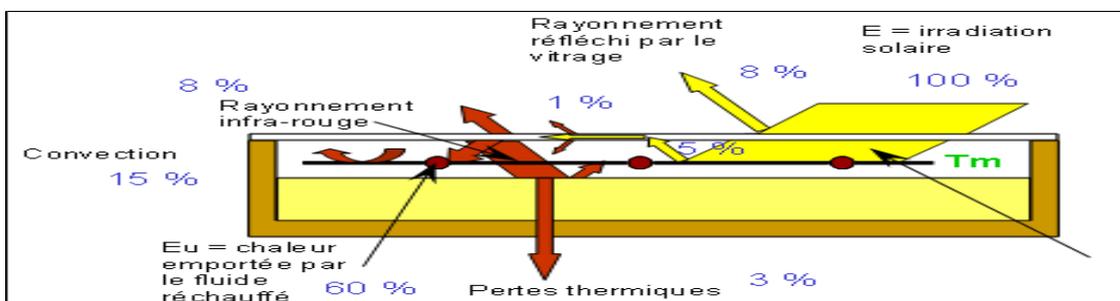


Figure 1. 17: Principe de fonctionnement du capteur solaire plan



Chapitre 2
chauffage solaire
de l'habitat

2.1 Introduction : [14]

L'utilisation d'eau chaude sanitaire est essentiels dans notre vie quotidienne on la voit Aujourd'hui omniprésente dans tous les bâtiments collectifs tels que les hôtels, les hôpitaux, Les cités universitaires, les cliniques..., et dans les logements individuels.

La plupart de ces bâtiments résidentiels utilise le chauffe-eau à gaz, pour la production de L'eau chaude sanitaire suite au prix du gaz qui est très abordable, dans notre pays. Malgré cela, Le chauffe-eau au gaz reste la principale cause, de la mort de plusieurs personnes dans leurs bains par asphyxie annuellement, et de l'émission du gaz carbonique dans l'atmosphère.

Suite à ce grand problème qui touche à la sécurité humaine, certaines populations ont pris l'initiative en interrompant définitivement sa relation avec le chauffe-eau au gaz en le remplaçant par le chauffe-eau électrique, qui malgré sa performance en matière de sécurité le cout de sa consommation électrique est très élevé. Pour parer à ces problèmes de sécurité pour les chauffe-eaux à gaz, d'une part, et le cout élevée la consommation de l'énergie électrique du chauffe-eau électrique d'autre part, nous proposons l'utilisation du chauffe-eau solaire qui présente les avantages suivants :

- L'utilisation d'une énergie propre et gratuite.
- Economie d'énergie.
- Possède une grande sécurité.

2.2 La production directe de chaleur pour l'habitat:

La chaleur peut être dérivée de l'énergie solaire directe; elle est suffisante pour exposer le corps au rayonnement solaire qui est chauffé et peut échanger de la chaleur avec le système.

Les maisons et l'eau des usages sanitaires peuvent donc être chauffées (chauffe-eau solaire). Pour cela, on utilise deux dispositifs :

- Un capteur plan sur le toit (réchauffe l'eau et/ou la maison).
- Le mur de Trombe-Michel (réchauffe seulement la maison).

Le principe de base de ces deux dispositifs est le même. Il est atteint en chauffant le fluide (air ou eau) avec l'énergie solaire. Une fois que le fluide a chauffé, il donnera de chaleur à l'eau sanitaire, l'eau dans le système de chauffage ou à l'air de la maison.

2.2.1 Le chauffe-eau solaire : [14]

Un chauffe-eau solaire est un dispositif qui capte une énergie gratuite non polluante et renouvelable du soleil pour la restituer dans l'eau chaude sanitaire de la salle de bains ou la cuisine, ce dernier est composé essentiellement d'un capteur ou panneaux solaire ainsi d'un réservoir de stockage appelé ballon de stockage.

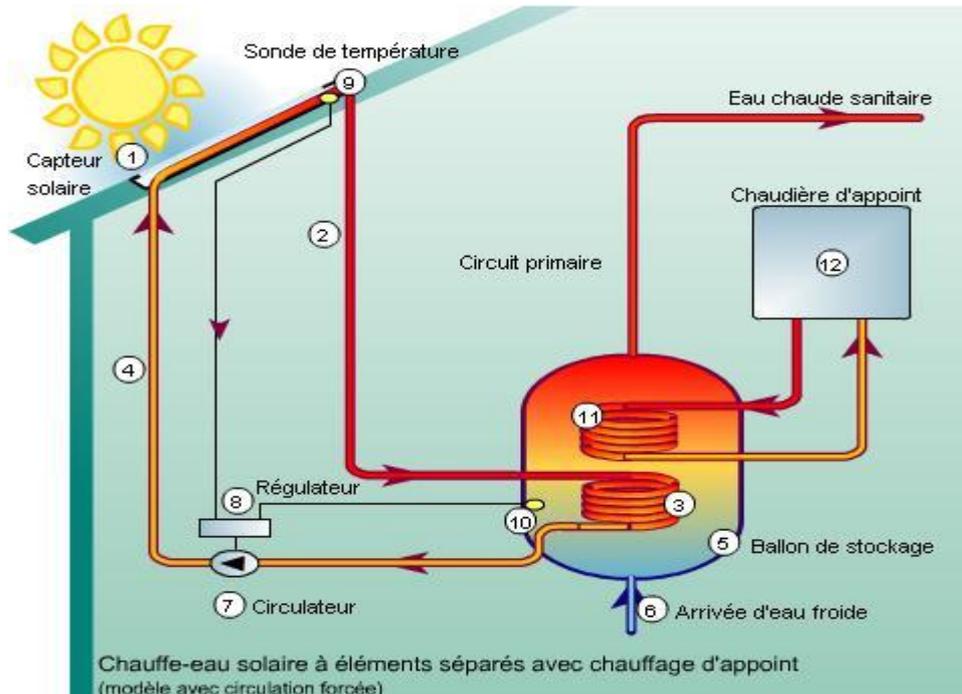


Figure 2.1 : Modèle du fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

Le principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire est simple : Il consiste à convertir l'énergie des rayons solaires absorbée par les capteurs en chaleur puis transportée vers Le ballon. Ce transfert est exécuté au moyen d'un liquide caloporteur, qui circule à l'intérieur des tubes des capteurs, se chauffe et se fait transporter grâce à une pompe, que l'on appelle aussi circulateur qui permet de diriger le fluide vers le ballon de stockage, par ailleurs cette chaleur portée par le fluide caloporteur se restitue par un échangeur, une sorte des serpentins qui cèdent ces calories à l'eau contenue dans le ballon.

2.2.2 Le chauffage solaire des maisons : [15]

La chaleur stockée par le fluide (eau-antigel) est utilisée pour chauffer la maison. Par conséquent, il doit chauffer l'eau alimentée par l'énergie solaire, où la chaleur peut être dispersée par des radiateurs ou la terre (une solution plus fréquente). Dans ce dispositif, le fluide échange sa chaleur avec la dalle qui transfère la chaleur du fluide à l'air domestique. Par conséquent, la dalle est un intermédiaire entre le liquide et l'air.

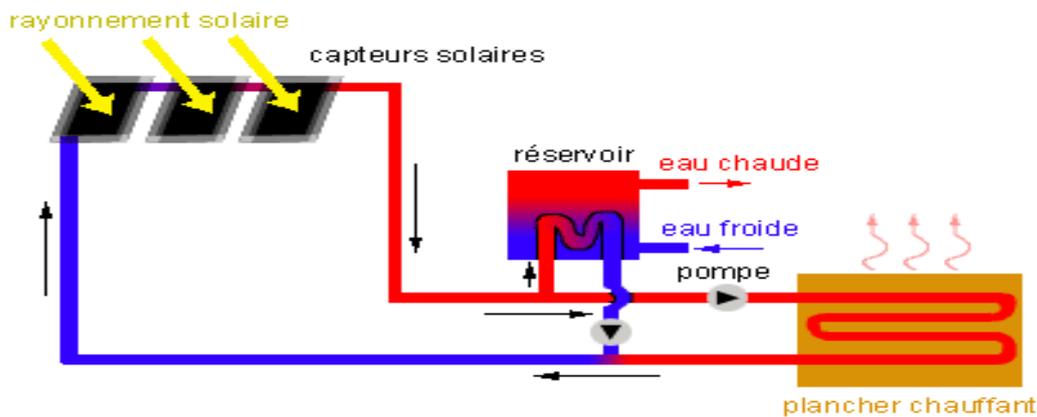


Figure 2.2 : Schéma d'une installation destinée pour le chauffage des maisons

Le réservoir d'eau chaude peut avoir deux fonctions :

- Il peut servir la nuit à chauffer la dalle de la maison. En effet la nuit le fluide ne peut pas se chauffer via les capteurs solaires. Il faut donc une réserve de chaleur pour le chauffage central ou bien utiliser une chaufferie classique.
- Il peut aussi tout simplement être utilisé comme chauffe-eau afin de fournir l'eau chaude sanitaire.

2.2.3 Le Mur Trombe-Michel: [16]

Le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel sont à l'origine de la création de ce mur qui porte leurs noms, le mur Trombe, également appelé mur Trombe-Michel. Il est particulièrement adapté aux constructions bioclimatiques dont le but est de limiter les besoins en chauffage et d'utiliser de manière optimale les ressources énergétiques provenant du climat. Le mur Trombe se compose d'une partie en béton devant laquelle on dispose un vitrage en laissant une lame d'air. Il possède des ouvertures en haut et en bas pour faire circuler l'air. Les rayons solaires traversent la vitre afin d'être

absorbés par le mur, peint dans une couleur sombre pour une meilleure absorption. Le mur se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge ne pouvant traverser le vitrage : la chaleur est piégée entre le mur et la vitre. On utilise alors le mur différemment selon les saisons et la période de la journée :

- La nuit : l'ouverture supérieure est fermée afin d'éviter que de l'air intérieur chaud vienne se refroidir dans la lame d'air pour retourner ensuite dans le domicile.
- Durant les mois d'hiver : l'air froid rentre dans le mur par les ouvertures du bas, grâce à un mouvement de convection. Il se réchauffe, monte puis retourne dans la maison via les ouvertures supérieures.
- Pendant les périodes chaudes : pour que le logement ne soit pas en surchauffe, l'air chaud est évacué la nuit en ouvrant le clapet supérieur tout en fermant celui inférieur

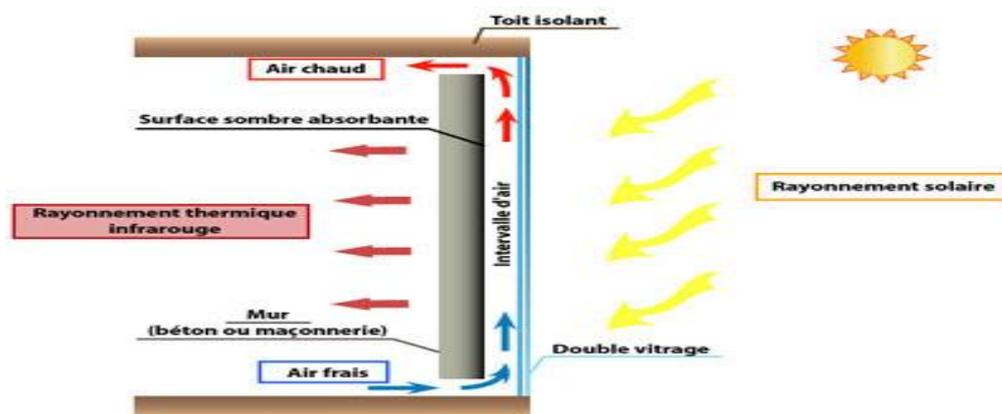


Figure 2.3 : Le mur Trombe-Michel

2.3 Rudiments d'un système de chauffage solaire:

Un système de chauffage solaire se compose d'un système de capteurs, d'un système de stockage, d'un système de circulation et de distribution de cette chaleur, et de régulateurs. L'élément clé du système est le capteur solaire, dont les fonctions sont d'absorber le maximum de rayonnement solaire et de transférer cette énergie au fluide caloporteur en émettant le minimum de pertes (de reflets, de conduction et de rayonnement). A présent, la forme de fluides caloporteurs les mieux connus dans les

applications de systèmes de chauffage solaire sont l'eau et l'air également un mélange d'eau et d'antigel est d'usage commun.

Dans le cas d'un moyen de transport d'énergie liquide, l'accumulateur peut être un réservoir de stockage.

Dans le cas d'un moyen de transport d'énergie à air, le médium de stockage est un contenant clos qui renferme un lit de pierres ou d'un autre matériau convenable.

Tous les systèmes de chauffage solaire, à part les plus simples, sont munis d'un système de circulation qui permet un transfert constant de fluide caloporteur du système de capteur au système de stockage. Sauf dans les cas où cette circulation se fait par convection naturelle, les systèmes emploient une pompe ou un ventilateur pour véhiculer le liquide caloporteur dans la direction voulue.

Un régulateur muni d'un détecteur de température contrôle le fonctionnement marche – arrêt de la pompe ou du ventilateur, selon les besoins, afin de maintenir un niveau de température optimal à l'intérieur du système.

On distingue deux types de systèmes de chauffage solaire : les systèmes passifs et les systèmes actifs.

2.4 Systèmes de chauffage solaire passifs: [17]

Contrairement au chauffage solaire actif, qui nécessite de l'énergie mécanique pour la dissipation thermique, le chauffage passif utilise les éléments structuraux du puits pour capter l'énergie solaire. Cette maison est donc équipée d'un patio droit. En hiver, l'énergie solaire chauffe le mur de pierre. La chaleur générée par le mur est soutenue par le verre du porche. En été, les rideaux ou les stores cachent le verre.

Les systèmes passifs les plus courants sont : Fenêtres, terrasse vitrée, serre, etc. Ces systèmes sont disponibles dans toutes les structures avec une fenêtre : Systèmes qui pénètrent la lumière du soleil par des ouvertures transparentes qui transportent à la fois la lumière et la chaleur.

L'énergie solaire est captée et stockée dans les énormes composants internes du bâtiment (dalles, plafonds, murs intérieurs). Avec l'énergie thermique, la fenêtre peut réduire la consommation d'énergie d'environ 10%.

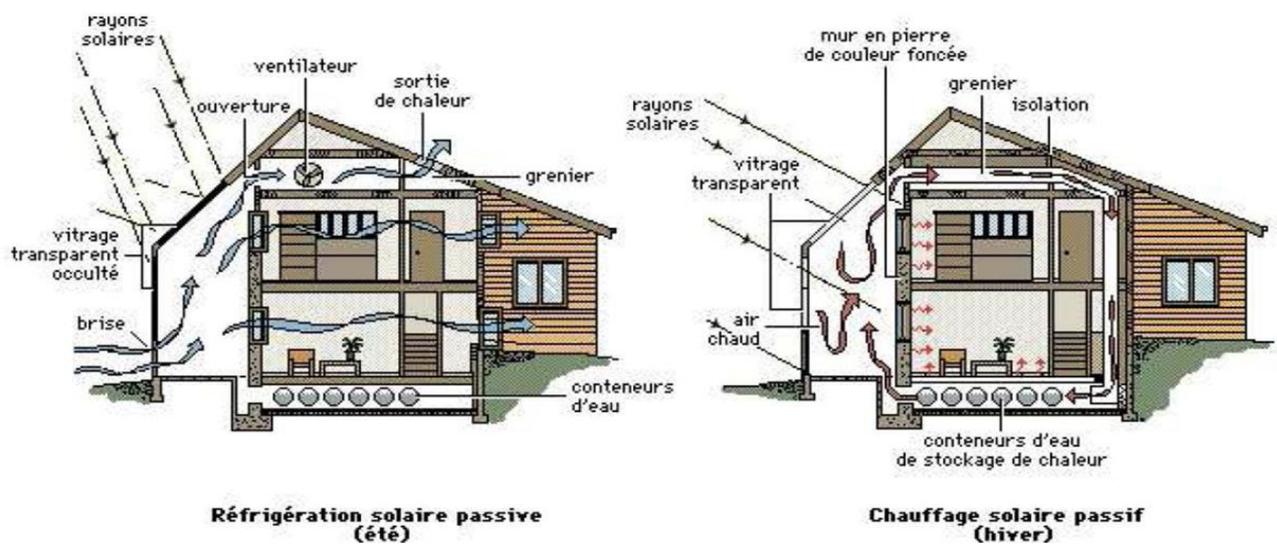


Figure 2.4: Système solaire passif

Système « passif » capte et distribue lui-même l'énergie solaire, sans utilisation des composants

« Actifs » : ventilation, pompes, nécessitant un apport d'énergie extérieur.

2.5 Systèmes de chauffage solaire actifs: [17] [18]

Le solaire thermique actif consiste à utiliser l'énergie solaire en ayant recours à des systèmes actifs (mécaniques) qui convertissent l'énergie solaire en énergie thermique pour produire de la chaleur (eau de piscine, eau chaude domestique, eau dans des procédés industriels, chauffage de l'air, etc.). Les systèmes thermiques actifs les plus courants sont les capteurs de polymères noirs (copolymères) pour l'eau de piscine, les panneaux solaires thermiques non vitrés, les panneaux thermiques vitrés, les panneaux à tubes sous vide et les murs solaires. Plusieurs autres systèmes solaires thermiques industrialisés existent sur le 30 marché international (Wall, Munari Probst et al., 2009). Par exemple, la compagnie québécoise Solaris a récemment développé un système solaire thermique composé de plaquettes de polycarbonate, laissant passer la lumière naturelle en bloquant les rayons infrarouges, qui a permis d'économiser, pour une application à Québec, pas moins de 24 000 litres de propane par année. De plus, il y a les concentrateurs solaires, tels que ceux utilisés à Hammarby Sjöstad, Stockholm.

2.5.1 Système de chauffage solaire actif à eau /à air :

Les systèmes de chauffage solaire actif utilisent des composants de haute performance, tels que des pompes, des ventilateurs, des thermostats, des vannes automatiques et d'autres dispositifs qui nécessitent plus d'entretien que les systèmes passifs, ce qui est donc plus coûteux que l'installation de systèmes passifs.

La classe commune des systèmes d'énergie solaire intérieurs ou en circuit ouvert, qui peuvent être utilisés dans divers domaines tels que le chauffage solaire, le chauffage de surface, la climatisation, le chauffage de l'eau et d'autres opérations de chauffage, comme le montrent les figures (2. 5) et (2. 6).

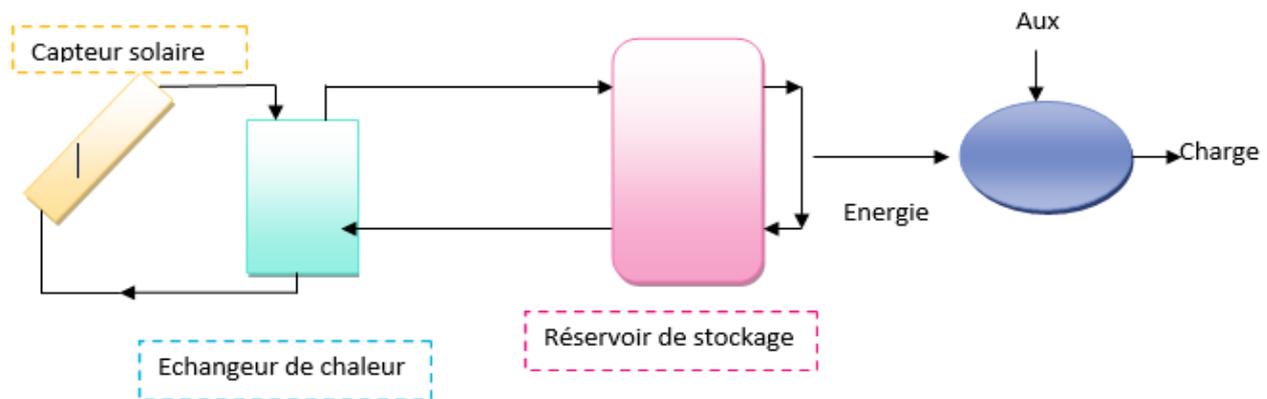


Figure 2.5: Système d'énergie solaire à eau en boucle fermée

L'énergie solaire est recueillie et stockée sous forme de chaleur sensible dans un réservoir liquide qui stocke l'eau chaude jusqu'à ce qu'elle puisse être utilisée. Pour éviter la perte d'énergie par les dispositifs de sécurité, le réservoir de stockage doit être scellé ou rempli d'un liquide à point d'ébullition élevé.

Si nécessaire, le liquide chauffé est pompé à partir du récipient via un échangeur de chaleur pour éliminer la charge de l'énergie thermique, du système fermé ou du liquide et au lieu d'un système de liquide froid avec une boucle ouverte est utilisé.

La charge est une demande d'énergie qui dépasse la température minimale de fonctionnement du T_{min} . La température minimale dépend du type d'application pour

chauffer les locaux résidentiels de T_{min} - la température interne du bâtiment d'environ 20°C peut être utilisée pour chauffer le bâtiment avec toute l'énergie au-dessus de 20°C . Il y a d'autres types d'applications de chauffage des espaces pour lesquelles la température T_{min} peut être supérieure ou inférieure à 20°C à titre d'exemple chauffage d'un entrepôt qui doit être maintenu à une température de 10°C . T_{min} est la principale température d'alimentation en eau.

Une énergie auxiliaire est prévue en appoint si l'énergie solaire est insuffisante pour satisfaire la demande (la charge).

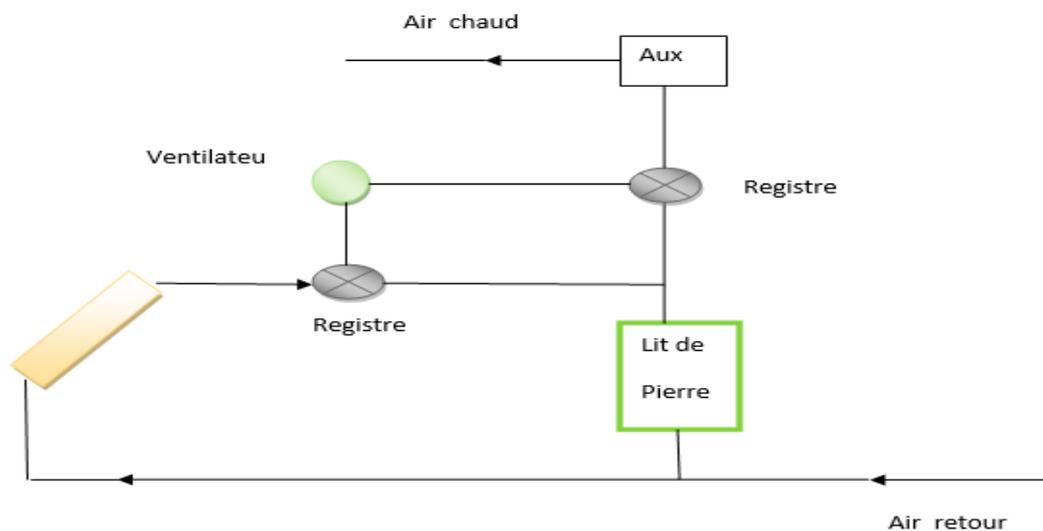


Figure 2.6 : Système de chauffage solaire à air avec stockage à lit de pierres

La figure (2.6) montre un système de chauffage solaire d'air utilisant un lit de pierres comme médium de stockage.

L'air est chauffé dans des capteurs solaires à air puis il est acheminé ou dirigé soit au bâtiment à chauffer ou bien vers le lit de pierres. L'énergie est stockée sous forme de chaleur sensible en chauffant le lit de pierres par circulation d'air à travers celui-ci.

2.6 Système de capteurs solaires:

2.6.1 Installation des capteurs solaires: [19]

Les capteurs solaires thermiques destinés à alimenter un chauffe-eau sont le plus souvent installés en toiture. Toutefois, si l'on dispose d'un mur libre, d'une terrasse ou d'un bout de jardin bien orientés, il est possible de les poser en façade ou au sol, ce qui supprime

les contraintes d'une pose en toiture. Avant de se lancer dans la pose d'un chauffe-eau solaire, il faut apprécier le rendement possible du dispositif.

Idéalement, un capteur solaire thermique doit être orienté plein sud, sous un angle de 45°. Il faut veiller à ce qu'aucun obstacle (arbres, immeubles...) ne réduise l'ensoleillement, en tenant compte notamment de l'évolution possible du rayonnement solaire selon les saisons. La situation géographique joue bien sûr un rôle essentiel. On considère, en moyenne, que la production d'un mètre carré de panneau est de 2,4 kWh dans le Nord et de 3,4 kWh dans le Sud. Mais, dans une configuration "chauffage" avec radiateurs à eau ou plancher chauffant, l'apport solaire est plus intéressant dans le Nord, puisque les températures y sont plus basses et donc les besoins de chauffage supérieurs. Au sol, Le terrain doit évidemment être adapté à une installation de ce type. L'intégration doit respecter la configuration du site et en préserver les grandes caractéristiques. La création de butte artificielle est à proscrire ; en général les capteurs peuvent trouver leur place contre un talus ou un mur existant.

En toiture La toiture permet généralement une intégration discrète des panneaux. Ils sont disposés de façon cohérente par rapport à la couverture et au volume de la construction afin de conserver un ensemble harmonieux. En cas de pente de toit inadaptée à la pose de capteurs sur le volume principal, on évitera d'installer un châssis sur le toit ou une rehausse sur béquilles (plutôt réservés aux toitures terrasses).

2.6.2 Protection contre le gel : [20]

En l'absence de soleil et avec des variations de température, le fluide caloporteur qui circule dans le système peut être soumis au gel. C'est lorsque la dose d'antigel dans le mix du fluide est insuffisante ou devient acide avec le temps et l'usure que les problèmes commencent à apparaître dans le système.

Cela peut notamment engendrer un gel des tubes dans les capteurs et un dysfonctionnement de la tuyauterie et le dépôt de moisissure dans le circuit. Il se peut même que des dégâts se remarquent à l'intérieur des échangeurs et des cuves des ballons qui sont généralement en acier et qui peuvent facilement se dégrader s'ils sont soumis à une forte agression.

Donc il y a Plusieurs solutions envisageables pour éviter ce problème ou limiter leur effet, comme :

A : Capteurs auto-vidange ables par gravité (système "Drainback") : [21]

Ce système permet d'évacuer complètement par gravité le fluide des capteurs à chaque arrêt de la pompe. Le circuit solaire doit contenir des éléments spéciaux, tels que : Une soupape tarée à 5 bars, pompe, un agencement de la tuyauterie sont nécessaires, Le principe de ce système est le suivant : A l'arrêt de la pompe le niveau du fluide se situe en partie supérieure ou au-dessus du réservoir. Les capteurs et la partie des canalisations dont la capacité correspond au volume d'expansion maximale du fluide sont remplis en air. Lors de sa mise en service la hauteur manométrique à débit nul de la pompe permet de remonter le niveau du fluide jusqu'au niveau supérieur des capteurs en chassant l'air vers le réservoir. Le volume d'air (non renouvelé) permet, d'une part le vidage des capteurs lorsque la pompe s'arrête, d'autre part l'expansion du fluide lors de son échauffement. Etant donné que ni l'air, ni le fluide ne sont renouvelés en fonctionnement standard, il n'y a pas besoin de traiter l'eau, et il n'y a pas de risque de corrosion.

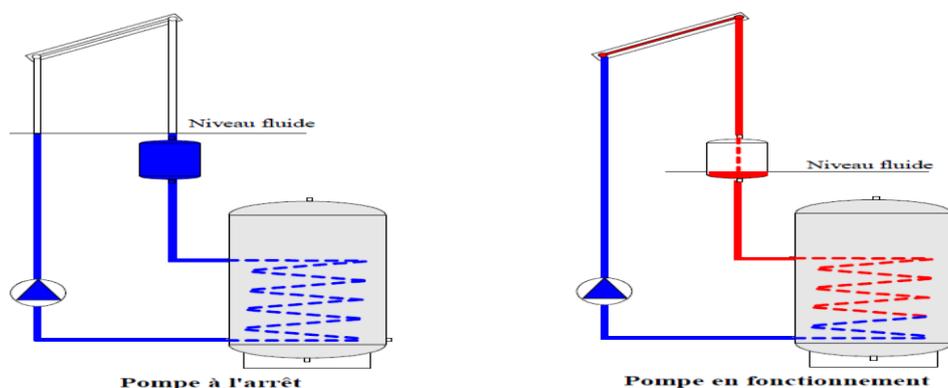


Figure 2.7 : système "Drainback"

B : Recirculation nocturne d'eau dans les capteurs : [21]

Ce système de protection est principalement conçu pour limiter les risques de gel dans les capteurs. Le principe est de faire circuler de l'eau chaude dans les capteurs lorsqu'un risque de gel est détecté. Cette chaleur nécessaire pour que ce système fonctionne provient du ballon de stockage chaud (qui a été "rechargé" au préalable soit

grâce à l'énergie solaire durant la journée, soit grâce à une source chaude d'appoint. Il peut également être envisageable d'utiliser cette technique contre les surchauffes en été : l'énergie en surplus dans le ballon est alors évacuée la nuit par radiation à travers les capteurs. Néanmoins cette solution n'est envisageable que si le volume de stockage est élevé et suffisant pour absorber toutes l'énergie en surplus durant la journée.

C : Les systèmes de chauffage solaires saisonniers :

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

2.7 Système de stockage :

Par définition « stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère » (Dumas, 2002) [22]

L'intérêt d'un système de stockage est de compenser le déphasage entre la production d'énergie venant de la source et la demande en énergie (Cabeza, Martorell, Miro, Fernandez, & Barreneche, 2015). Dans notre cas, la source d'énergie est le soleil dont nous pouvons recevoir l'énergie thermique le jour et plus particulièrement les jours de beau temps. À contrario, la demande en chauffage d'une habitation est en général plus haute la nuit et les jours de mauvais temps. En effet, nous pourrions considérer l'enveloppe de notre bâtiment comme un collecteur plus ou moins efficace selon son isolation, son inertie, ses surfaces vitrées... Les jours de beau temps, le bâtiment profite donc des apports solaires qui contribuent donc à réduire ses besoins résiduels. Le stockage d'énergie fonctionne par cycle dans lequel nous pouvons observer trois phases (Cabeza, Martorell, Miro, Fernandez, & Barreneche, 2015) :

- La charge. Cette phase correspond au moment où la source produit de l'énergie et que le milieu de stockage n'est pas saturé en énergie.
- Le stockage. Cette phase correspond au moment où le dispositif de stockage ne reçoit plus d'énergie venant de la source (soit car la source n'émet plus, soit car le

système de stockage est plein) et que le bâtiment ne demande pas d'énergie du système de stockage.

- La décharge. Cette phase correspond au moment où, afin de satisfaire ses besoins en énergie, le bâtiment puise dans le système de stockage.

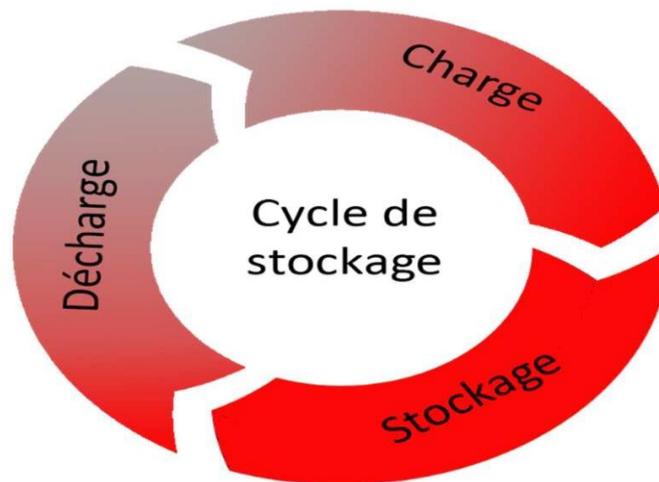


Figure 2.8 : Cycle de stockage

Nous pouvons distinguer les modes de stockages selon différents critères :

- L'état physique du matériau de stockage qui peut être fluide ou solide.
- La plage de température à laquelle fonctionne le système.
- La durée de stockage visée. On distingue ici le stockage longue durée (plusieurs semaines voire plusieurs mois pour un stockage inter saisonnier).
- Le « concept » de stockage : on distingue ici les systèmes directs (ou le fluide caloporteur sert de matériau de stockage) des systèmes indirect (ou le fluide caloporteur ne sert pas de matériau de stockage). [23]

La conception des cuves de stockage d'eau est optimisée, de diverses manières : très haut degrés de stratification, diminution des pertes de chaleur du réservoir et augmentation de l'efficacité globale du système capteur-stockeur.

L'isolation joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, non seulement au niveau des absorbeurs, mais aussi pour calorifier les

tuyauteries chargées de véhiculer la chaleur le ballon de stockage et la maison elle-même.

Un autre moyen adopté pour l'accroissement de la capacité de stockage de la chaleur dans une construction est d'intégrer un matériau à changement de phase. Un exemple est l'ajout de la paraffine dans les panneaux qui augmente de façon spectaculaire leurs capacités thermiques.

Nous pouvons recenser trois types de stockage d'énergie thermique, actuellement :

2.7.1 Le stockage sous forme de chaleur sensible :

Il s'agit du type de stockage le plus basique : le principe est de faire monter la température du matériau de stockage, de le conserver à cette température (en minimisant les pertes) puis de récupérer la chaleur par simple transfert de chaleur. Le stockage sensible est le stockage le plus commun et une large gamme de matériaux « low-cost ». Les grandeurs caractéristiques d'un matériau de stockage sensible sont sa masse volumique ρ et sa capacité thermique massique C_p . [24]

Le stockage par chaleur sensible peut être réalisé à basse température ou à haute température en fonction de la température du fluide caloporteur requise.

- Base température

L'eau liquide, la roche et le béton sont les matériaux les plus souvent utilisés pour les stockages à température inférieure à 100°C. L'eau a cependant l'inconvénient d'être corrosive. Son utilisation est avantageuse si le fluide de travail est aussi l'eau, comme c'est le cas dans le cumulus utilisé dans les chauffe-eau solaires.

- Haute température

Par haute température dans le domaine solaire, on entend des températures supérieures à 500°C. C'est la gamme de températures qu'on rencontre dans la production d'électricité avec capteurs à concentration. Les matériaux idéaux pour cette gamme de Température sont : les sels fondus (Draw salt, HTTEC, Solar salt, etc.), l'eau pressurisée, les huiles organiques hautes températures, le béton de haute température, les céramiques réfractaires, etc., La composition et les propriétés thermo physiques de certains matériaux mentionnés ci-dessus sont données dans le Tableau. [22] [25]

	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	C _p (350°C) [J kg ⁻¹ K ¹]	ρ [kg m ⁻³]
Eau liquide (0°C<T<100°C)	0,6	4186	1000
Eau vapeur (T=300°C)	0,04	2,026	0,3652
Draw Salt : 50 NaNO ₃ / 50 KNO ₃ (220°C<T<540°C)	0,4		1733
HITEC : 40 NaNO ₂ / 7 NaNO ₃ / 53 KNO ₃ (142 °C<T<540 °C)	< 1		1680
Granite	2,79	775	2630
Céramique réfractaire (programme WESPE, T<400°C)	1,35	866	3500
Béton haute température (programme WESPE, T<400°C)	1	916	2750
Béton haute température (programme WANDA, T<400°C)	1,3	1100	2250

Table 2.1: Propriétés thermo physiques de quelques matériaux pour le stockage par chaleur sensible, (Pincemin, 2007). [22]

Quelques exemples de stockage de chaleur sensible :

- Dans les systèmes de chauffage domestiques, on utilise parfois la grande inertie thermique de certains matériaux (briques, huile) pour restituer lentement la chaleur accumulée au cours de périodes où la chaleur a été produite ou captée. Mais le plus souvent, le stockage est assuré par un ballon d'eau chaude isolé.
- Dans les fours à feu de bois, en brique et terre réfractaire, la capacité de la voûte du four à emmagasiner la chaleur est utilisée pour la cuisson d'objets (poterie, émaux, etc.) ou de plats (pain, pizza, etc.).

Stockage de l'énergie excédentaire produite par les centrales solaires le jour, afin d'être utilisée le soir et la nuit (exemple : chauffage urbain de la ville de Krems sur le Danube).

2.7.2 Le stockage sous forme de chaleur latente : [26]

Le stockage latent consiste à utiliser le changement d'état d'un matériau pour stocker l'énergie. La grandeur caractéristique du stockage latent est l'enthalpie de changement d'état que l'on notera ΔH_{MCE} (MCE = matériau changement d'état).

La différence ΔH_{MCE} étant la plupart du temps fortement supérieure à c (environ 100 à 200 fois plus grand) (Tian & Zhao, 2012), le stockage latent permet de stocker une quantité d'énergie bien plus importante que le stockage sensible. Cependant le stockage latent implique également des difficultés techniques supplémentaires (encapsulèrent des matériaux, variation de volume et de pression...) qui, couplées au prix des matériaux, rendent cette solution moins accessible économiquement que le stockage sensible pour

de petites installations comme le chauffage d'une habitation Le stockage par chaleur latente présente deux avantages par rapport à la chaleur sensible (Dumas et PY, 2009):

- Le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps. Ce changement d'état s'opère à température constante, donc il permet de régler la température du milieu de changement de phase (exemple habitat).
- Une autre différence entre le mode de stockage par chaleur sensible et latente est due aux très fortes capacités de stockage du latente par rapport à sensible.

Quelques exemples de stockage de chaleur latente :

- Des matériaux à changement de phase (MCP) sont actuellement étudiés pour améliorer l'inertie thermique des parois des bâtiments.
- Les pompes à chaleur, notamment les réfrigérateurs, congélateurs et climatiseurs, utilisent des fluides changeant de phase comme caloporteurs. Ceux-ci ne stockent pas à proprement parlé de chaleur, l'emmagasinant uniquement le temps du transport.

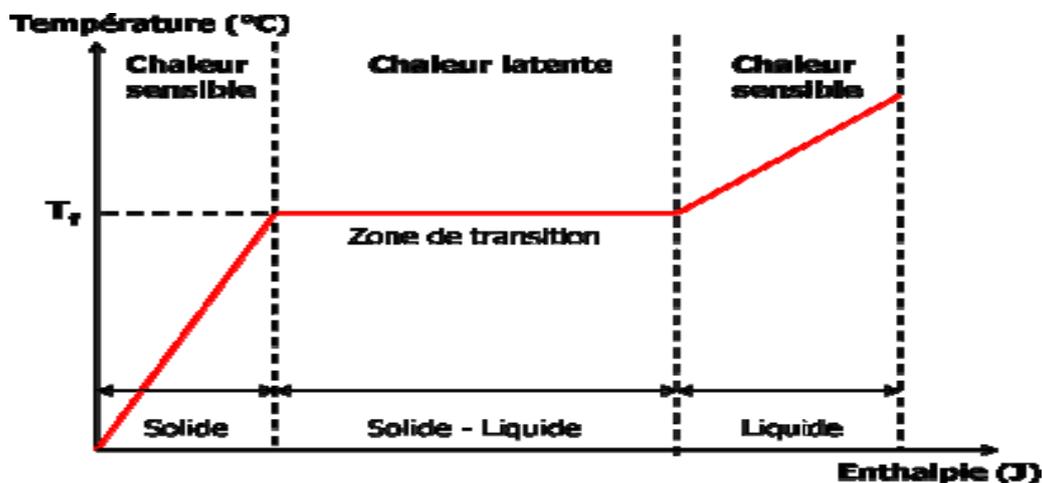


Figure 2.9 : Changement d'état présenté dans un diagramme température-enthalpie

2.7.3 Stockage journalier et stockage saisonnier : [27]

Dans le stockage saisonnier, l'énergie solaire est stockée en été pour être utilisée en hiver. Cette pratique est utilisée dans les applications domestiques, en particulier le

chauffage des locaux. Dans certains cas, la demande d'énergie tout au long de l'année est plus ou moins uniforme.

Le principe du stockage inter-saisonnier d'énergie solaire est présenté Figure 2.10

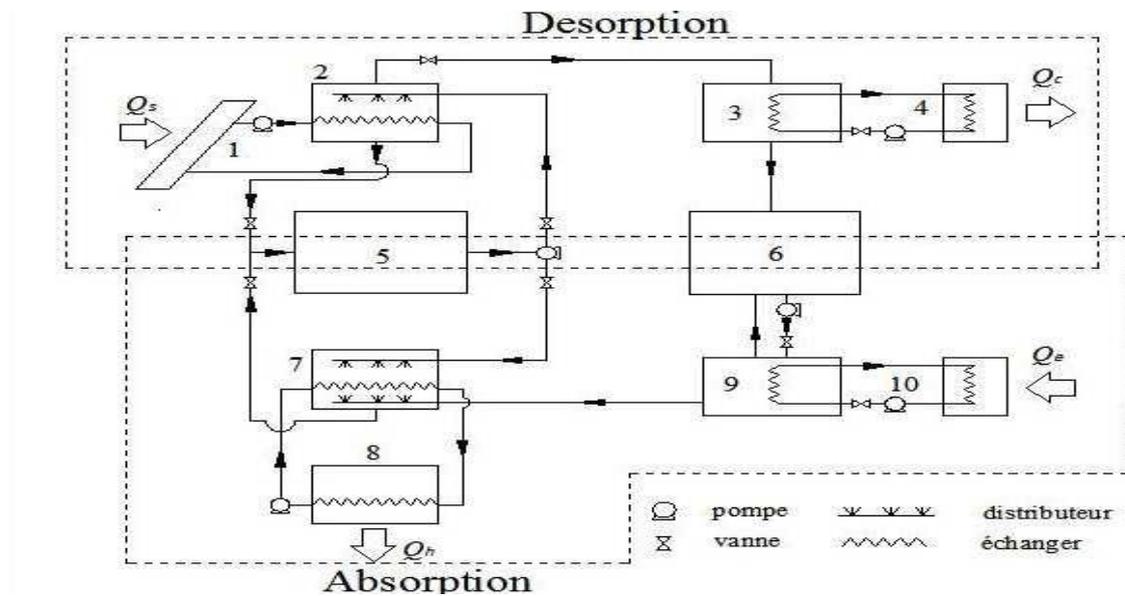


Figure 2.10 : Description schématique du procédé de stockage inter-saisonnier d'énergie solaire

Le fonctionnement du cycle se décompose en deux phases : une phase de stockage de l'énergie solaire au cours de l'été (cadre pointillé du haut de la figure) et une phase de déstockage et d'utilisation de l'énergie thermique au cours de l'hiver (cadre pointillé du bas de la figure). Au cours de la phase d'été, la solution pauvre dans le stock (5) est transférée au générateur (2) où elle résorbe de la vapeur grâce à l'énergie thermique disponible au niveau du capteur solaire (1). La vapeur est transférée au condenseur (3) et se condense grâce à l'échangeur (4). Le fluide condensé est alors transféré au réservoir de stockage (6). La solution riche est alors évacuée du générateur vers le stockage de Solution (5). Au cours de la phase d'utilisation de la chaleur, le fluide dans le stock (6) est transféré à l'évaporateur (9) où il est vaporisé grâce à la chaleur géothermique à faible température (10).

La vapeur s'écoule vers l'absorbeur (7). La solution riche dans le réservoir de solution (5) est également transférée à l'absorbeur (7), où elle absorbe la vapeur venant de

l'évaporateur. La chaleur ainsi produite par le phénomène d'absorption est transférable à l'habitat pour son chauffage (8). La solution pauvre est alors recerclée vers le stockage de solution (5). Grâce à ce fonctionnement intermittent, l'énergie solaire est stockée par désorption lorsqu'elle est en excès et peut être utilisée par absorption lorsqu'elle est en déficit par rapport aux besoins du bâtiment. Comme ce stockage ne met pas en jeu de chaleur sensible ou latente (les réservoirs de stockage restent à température ambiante), mais un stockage sous forme de potentiel thermochimique, il n'y a pas de perte de chaleur au cours de stockage. La durée de stockage est ainsi modulable et peut durer plus d'une saison.

2.8 Système de distribution : [28]

Le *réseau* de chauffage urbain, plus connu sous le nom de réseau de chaleur, consiste en un système de distribution de chaleur qui permet un acheminement vers plusieurs usagers via un ensemble de canalisation à partir d'une production centralisée. Ce réseau peut s'appuyer sur des énergies renouvelables mais peut également en utiliser d'autres. En termes de surface, on se place en général à l'échelle du quartier.

Principalement à destination des locaux d'habitation pour assurer le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, ce réseau peut toutefois desservir tout autre type de bâtiment, que ce soit un centre commercial, des bureaux, un hôpital, etc.

Pour fonctionner, ce dispositif se compose de différents éléments que sont la ou les unités de production de chaleur, le réseau de distribution primaire (assure le transport de la chaleur via un fluide caloporteur) et des sous-stations d'échange (permettent l'alimentation via un réseau de distribution secondaire).

Pour les systèmes de chauffage solaire utilisant l'air, la fourniture de la chaleur par réseau de gaine est un choix évident.

L'eau et la pierre sont souvent utilisées dans les applications basse température.

2.9 Quelques caractéristiques climatiques du site de Tlemcen :

2.9.1 L'humidité relative :

L'humidité atmosphérique joue un rôle majeur dans le confort du bâtiment: à des températures élevées, associées à une humidité excessive, les occupants se sentiront

mal à l'aise. La ville de Tlemcen se caractérise par son humidité relative modérée, qui ne provoque généralement pas d'inconfort.

En étudiant les variations annuelles de l'humidité relative, nous avons remarqué que les valeurs maximales étaient observées dans les mois de janvier et décembre, les valeurs observées de janvier à mars diminuaient légèrement et les valeurs minimales étaient observées en juillet.

Comme le montre la figure (2.11), la valeur annuelle moyenne de l'humidité relative pour le site de Tlemcen est de 66%

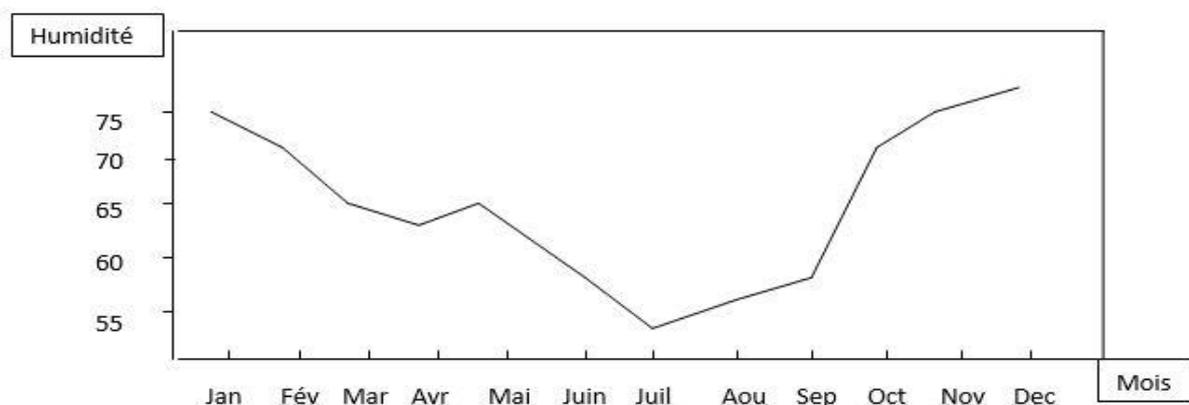


Figure 2.11: Variation mensuelle de l'humidité relative (%) du site de Tlemcen

2.9.2 Vitesse de l'air :

La vitesse de l'air à l'intérieur de la maison est relativement faible, allant de 0 à 0,5 m/s, à moins qu'il y ait une ventilation naturelle ou forcée.

L'instrument le plus généralement utilisé est l'anémomètre thermique, pour la mesure de la vitesse de l'air.

2.9.3 Température de l'air :

Il est difficile de définir avec exactitude les conditions de confort d'une habitation. Le confort thermique est donc en fonction des changements ainsi que la température atteinte ; la largeur de « la zone de confort » dépendra donc de l'équilibre entre ces deux type d'action.

La relation adaptative entre la température de confort et la température extérieure peut être utilisée pour aider à concevoir l'intérieur de la maison.

La température intérieure de confort T_{con} est calculée à partir des températures extérieures moyennes $T_{ex, moy}$ et tracée sur une base mensuelle au même titre que la moyenne mensuelle du maximum journalier $T_{men, moy}$ et du minimum journalier $T_{men, min}$ et de la température de l'air extérieur moyenne T_m .

Les courbes de température consignées sur la figure (2.7), montre les variations saisonnières de la température moyenne de confort, T_{con} à Tlemcen et son rapport avec la moyenne journalière maximum, minimum et la température extérieur moyenne $T_{ex, moy}$. La relation utilisée pour calculer la température de confort à partir de la température extérieure est donnée par Humphrey (1978).

De telles courbes aident le concepteur à juger si le chauffage passif est possible pour tel climat. Le rapport entre la température de confort et l'intervalle des températures extérieures montre si le chauffage est nécessaire durant la période d'hiver pour maintenir la maison confortable. Cette méthode a été employée par Roaf et al, 2001 pour le confort intérieur.

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Oct.	Nov.	Déc.
T_{con}	19.41	20.18	21	22	23.98	22	20

Table 2.2: Température de confort de la période de chauffage pour Tlemcen [28]

2.9.4 Adaptation de la ressource aux besoins :

Le fait qu'on ait le plus besoin de soleil au moment où il est le moins disponible constitue évidemment le principal handicap du chauffage solaire. La figure (2.12) illustre parfaitement le déphasage entre ressources et besoins.

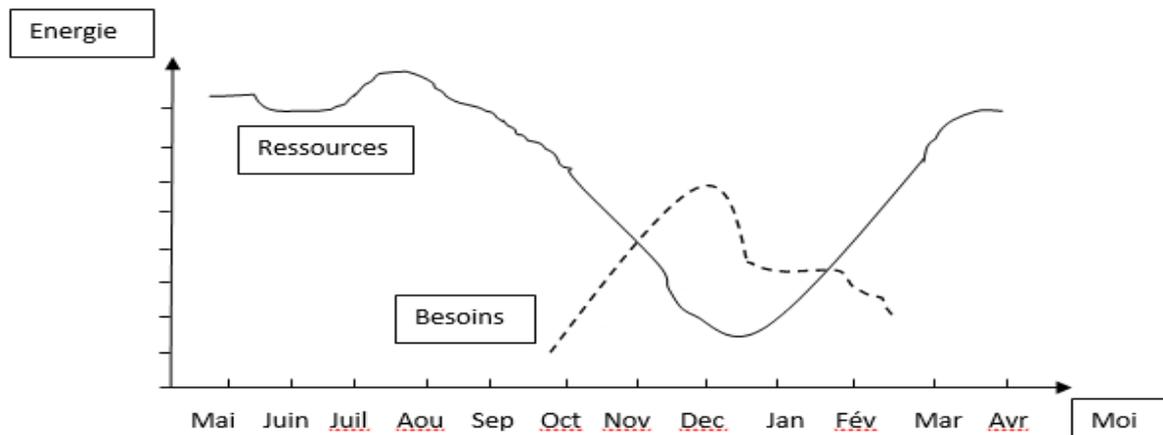


Figure 2. 12: Déphasage entre ressources et besoins pour le site de Tlemcen

On note également dans la figure 2 que la demande d'énergie thermique (chaleur) dans la ville de Tlemcen est importante en saison hivernale, bien sûr, pour une utilisation dans le chauffage et les usages domestiques, en particulier au mois de décembre, lorsque la demande atteint une valeur maximale. En revanche, les sources d'énergie (solaire) est le moins disponible en hiver. Cela nous oblige à utiliser des techniques de stockage comme solution.

Donc, Si l'on pouvait stocker une fraction de l'énergie estivale disponible jusqu'à son utilisation en hiver, les besoins en chauffage non solaire pourraient être énormément réduits ou bien même supprimés.

En équipant une telle maison de capteurs solaires, d'importantes économies seront réalisées. En absence du stockage, la puissance installée restera la même, à tous moment, à la demande maximale représentée par la somme de toutes les puissances du pays.

2.10 Description de l'installation étudiée :

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

- ❖ Sous système solaire (captage et stockage).
- ❖ Sous système de distribution (eau chaude sanitaire et le chauffage).

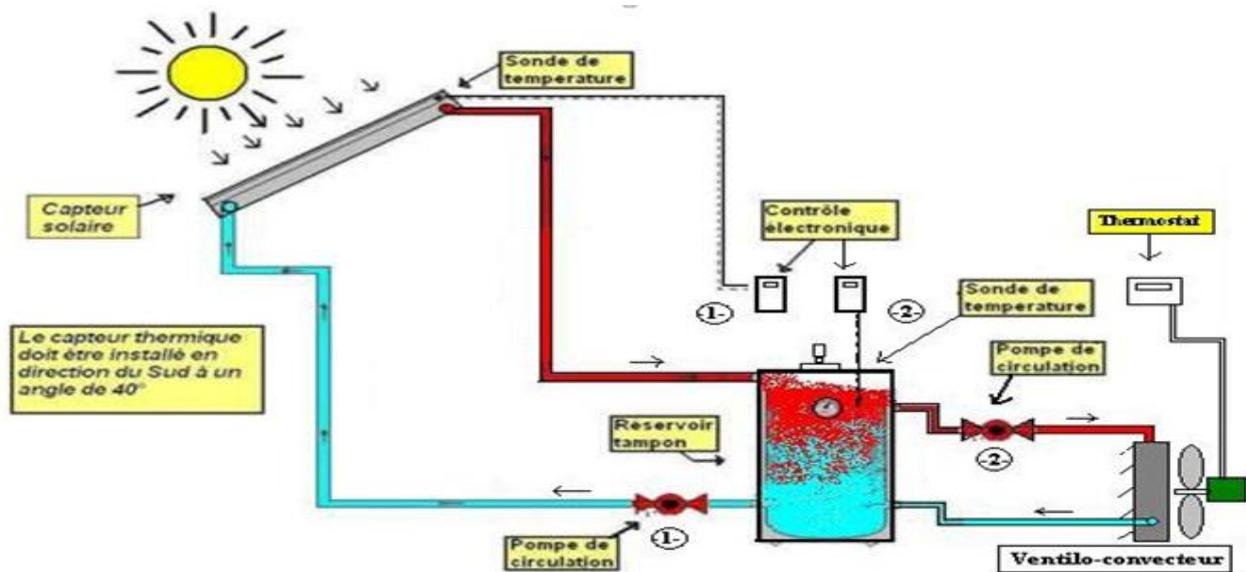


Figure 2.13: Structure du système de chauffage global et les sous systèmes

2.10.1 Principe de fonctionnement :

2.10.2 Système solaire :

La boucle solaire est constituée :

- D'un système de captage (capteurs solaires).
- D'un system de circulation.
- UN system de régulation.
- D'un réservoir de stockage.

Les capteurs solaires et le réservoir de stockage sont reliés entre eux par une tuyauterie calorifugée qui assure la circulation du liquide primaire, le fluide caloporteur (eau glycol) est mis en circulation entre le captage et le stockage par une pompe.

2.10.3 Différents organes de sous système solaire :

a) Les captures solaires :

Les capteurs solaires captent l'énergie solaire et la transforment en énergie thermique qui est transmis au fluide caloporteur (eau glycol), cette énergie thermique

est stockée sous forme de chaleur sensible dans un réservoir jusqu'à ce qu'elle puisse être utilisée.

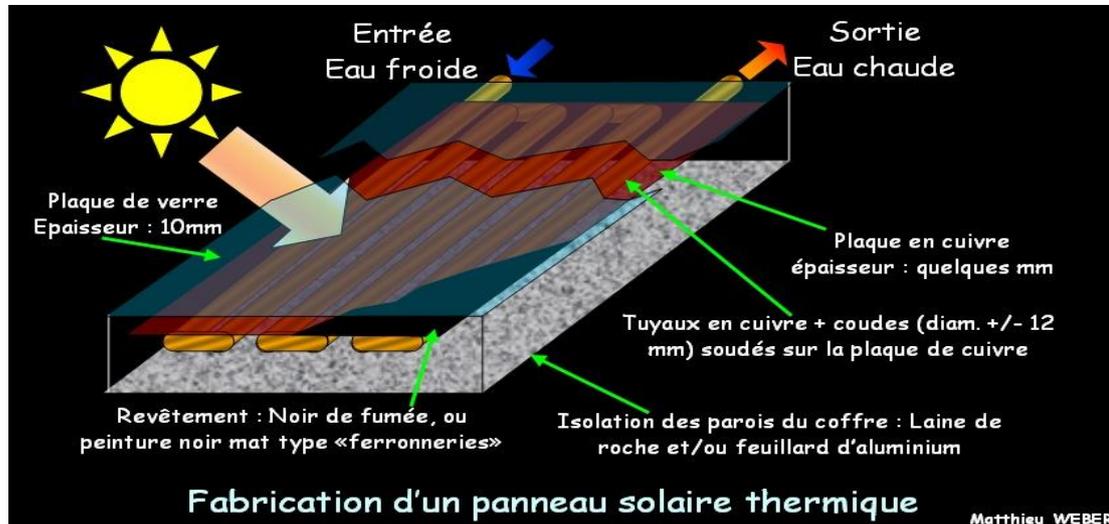


Figure 2.14: Capteur solaire plan à eau vitré

b) Le ballon de stockage : [29]

Ballon de stockage: C'est un réservoir de stockage d'énergie sous forme d'eau chaude ou d'eau glacée dans le cas d'application de chauffage ou de climatisation. Le ballon de Stockage eau chaude sert à réaliser une capacité tampon d'eau soit pour des besoins de chauffage que de fourniture d'eau chaude sanitaire.

Cette cuve métallique est bien isolée constitue la réserve d'eau chaude, cette eau chaude soutirée est remplacée immédiatement par la même quantité d'eau froide du réseau.

La différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide conduit à l'établissement d'un gradient de température dans un ballon de stockage d'eau chaude, la température de l'eau est plus élevée en haut qu'en bas du ballon.

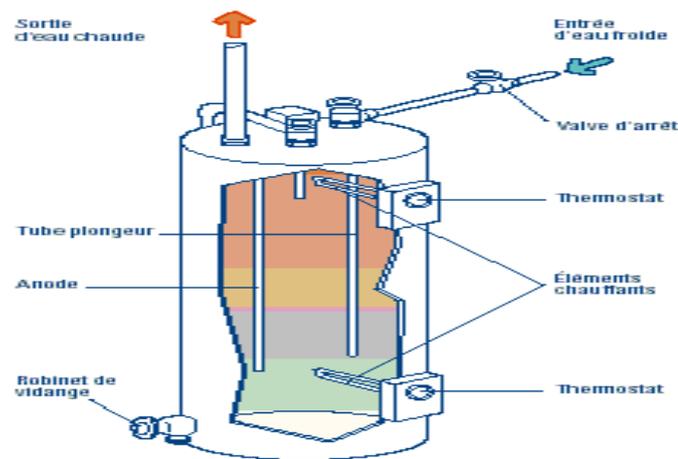


Figure 2.15: Réservoir de stockage d'eau chaude

c) Le système de régulation :

La régulation du transfert de chaleur vers le réservoir (s'arrête quand $T_{\text{capteur}} < T_{\text{réservoir}}$), la régulation compare à tout moment la température du capteur et celle de la partie basse du ballon. Alors si l'eau dans le ballon est plus chaude, la régulation arrête le fonctionnement du circulateur. A l'inverse quand le fluide caloporteur est plus chaud que l'eau qui se trouve au ballon le circulateur est automatiquement remis en route et le liquide primaire transmet sa chaleur à l'eau chaude du ballon.

d) La pompe (le circulateur) :

Une pompe électrique met en mouvement le liquide primaire, son rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le ballon de stockage. Son utilisation permet aussi d'interrompre le transfert de chaleur lorsque l'eau des capteurs n'est pas plus chaude que celle dans le réservoir. La pompe utilisée fonctionne à 230V, elle a une hauteur maximum de pompage d'environ 35m, un tuyau d'aspiration et un tuyau de refoulement et un tuyau de rinçage avec un filtre.

e) Dispositif de chauffage d'appoint :

L'appoint est indispensable pour assurer la permanence du service d'eau chaude en hiver, en demi-saison ou par longue période de mauvais temps.

L'appoint utilisé à l'installation est une résistance électrique placée au tiers supérieur du ballon solaire.

Sur autres modèles, l'appoint se fait par une chaudière (gaz, fioul.) disposée en aval du ballon de stockage.

2.10.4 Système de distribution :

Ce système assure la distribution de la chaleur vers l'espace à chauffer grâce à un ventilo-convecteur, ce dernier assure le chauffage par la ventilation d'air chaud à l'intérieur de la salle.

2.11 Bilans énergétiques des sous-système :

2.11.1 Sous Système de captage solaire :

L'énergie utile Q_u délivrer par un capteur solaire plan de surface A_C (on négligeant les effets transitoires) est donnée par l'équation [W]:

$$Q_u = AC [I_c \eta_0 - U * (T_{pm} - T_a)] \quad [2.1]$$

Où :

I_c : Intensité des radiations solaires dans le plan du capteur.

η_0 : Efficacité optique du capteur, c'est le produit de la transparence du couvert (vitrage) par l'absorptance de l'absorbeur. (Rendement optique)

U : Coefficient global de perte thermique du capteur.

T_{pm} : Température moyenne de l'absorbeur.

T_a : Température ambiante.

2.11.2 Sous Système de stockage :

$$q_r = M_r C_r \frac{dT_r}{dt} = m_f (T_{2f} - T_{1f}) - Q_R - Q_U \quad [2.2]$$

$$Q_r = A_r h (T_r - T_a) \quad [2.3]$$

$$Q_u = m_u C (T_u - T_{ap}) \quad [2.4]$$

q_r : Chaleur stockée dans le réservoir.

T_r : Température de réservoir.

T_{ap} : Température d'appoint.

T_u : Température utile.

A_r : Surface du réservoir.

Q_u : Chaleur utilisé.

Q_r : Chaleur convective de réservoir vers l'ambiant.

h : Coefficient de convection.

T_a : Température ambiante.

T_{2f} : Température de sortie du réservoir.

T_{1f} : Température d'entrée de réservoir.

m_f : Débit du fluide.

2.12 Conclusion :

Il existe plusieurs méthodes de chauffage solaire. Chacun aura un impact sur l'apparence de la maison, la consommation d'énergie et les coûts de construction. L'utilisation de l'énergie solaire dans la maison peut couvrir différentes technologies, thermique ou photovoltaïque.



Chapitre 3
simulation et
interprétation

3.1 Introduction :

En raison des prix élevés du gaz naturel et de l'électricité, notre projet vise à utiliser des énergies alternatives telles que l'énergie solaire pour réduire le taux de consommation de gaz et d'électricité, donc dans ce chapitre, nous effectuons des simulation en utilisant le logiciel T*SOL pour une installation spécifique pour produire de l'eau chaude et réaliser une étude complète du projet à matérialiser et obtenir des résultats réels pour le taux de couverture, le rendement, l'efficacité, le volume de consommation.

3.2 Présentation générale du logiciel T*SOL : [30]

T*SOL est un programme de conception et de simulation d'installations thermiques solaires avec préparation d'eau chaude, appoint de chauffage, chauffage de la piscine, chaleur industrielle et installations de grande taille.

Les utilisateurs sont les planificateurs, installateurs, conseillers en énergie et architectes.

T*SOL basic est conçu pour la simulation d'installations solaires pour des habitations d'une ou deux familles. Il permet une présentation rapide de l'installation solaire incluant les estimations en termes de rendement et de rentabilité correspondantes. Les systèmes simples et typiques disponibles couvrent env. 80% des champs d'application d'installations comparables utilisées en Europe et aux USA.

Au-delà des systèmes standards, T*SOL Pro propose aussi des systèmes adaptés aux entreprises, aux piscines couvertes, chaleurs de procédé et aux grandes installations. De plus, l'étude du projet est simplifiée :

- Plusieurs variantes pour un même projet, arbre du projet.
- Étude de l'ombre portée, assistance au dimensionnement, diagramme de résultat.
- Profils de charge et composant modifiable (chaudières, collecteurs, Accumulateurs).

T*SOL Expert est également adapté à la simulation de réseaux solaires.

Ce programme permet au concepteur d'étudier l'influence des différentes pièces de l'installation sur le fonctionnement d'une installation thermique solaire. Tous les

paramètres du système peuvent être rapidement modifiés à l'aide de l'interface utilisateur.

Vous pouvez analyser les résultats de la simulation sous forme de tableau ou de graphique. Les bases de calcul avancées de T*SOL[®] en font un véritable outil professionnel de planification d'installations thermiques solaires.

3.3 Caractéristiques particulières des composants :

Notre système est conçu pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) pour une ou plusieurs maisons, et il se compose de : des capteurs solaire plans, deux réservoirs en série, pompe, canalisation (circuit solaire), Chauffage d'appoint (chaudière à gaz).

Cette installation est destinée pour :

- Transformation de l'énergie solaire irradiée en chaleur par le biais de capteurs.
- Acheminement de la chaleur à travers le réseau de conduites en direction du Ballon.
- Stockage de la chaleur dans le ballon tampon jusqu'à ce que le consommateur en Ait besoin.

3.3.1 Le capteur solaire plan:

L'élément principal d'une installation thermique solaire est le capteur ou l'absorbeur qui transforme l'énergie solaire en chaleur et l'achemine vers un ballon à travers des conduites et un échangeur de chaleur avec un fluide caloporteur.

Les systèmes de capteurs avec des capteurs plans contiennent un absorbeur (le plus souvent en métal) dans un coffrage fermé qui est pourvu d'une couverture transparente et d'une isolation thermique arrière. La couverture transparente réduit le rayonnement de l'absorbeur sur l'environnement et l'isolation thermique diminue les pertes de chaleur à l'arrière de manière à pouvoir atteindre des températures de plus de 150°C. Ils sont principalement utilisés pour la préparation d'eau chaude et pour l'appoint de chauffage. Les capteurs plans sont disponibles dans plusieurs tailles, de 1 à 10 m². Des formes spéciales (par ex. triangulaires) sont également possibles. Ils sont intégrés à des modules préfabriqués dans la couverture du toit ou sont fixés sur la couverture du toit et connectés entre eux.

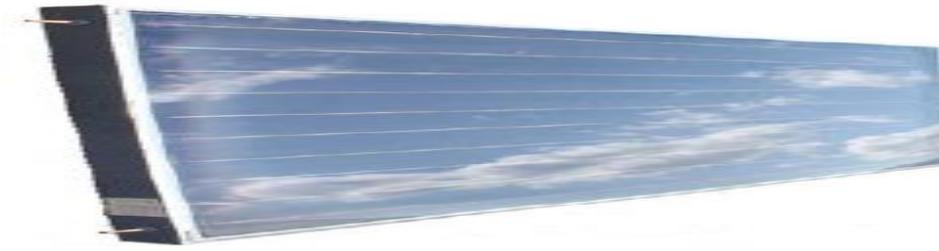


Figure 3.1: Schéma d'un capteur solaire plan

3.3.2 L'accumulateur sanitaire :

Destiné à la fois au chauffage et eau chaude sanitaire, l'accumulateur sanitaire est un chauffe-eau en acier (sur option : acier Inox 316) d'une capacité de 100, 200, 300, 400, 500 ou même 800 litres, selon les besoins d'eau chaude sanitaire ECS. Il est équipé de deux échangeurs :

- Un échangeur solaire surdimensionné pour optimiser les échanges thermiques
- Un échangeur thermique à alimenter par un appoint extérieur : chaudière (sur option, l'accumulateur peut aussi recevoir une résistance électrique de 2 kW).

Comportant aussi une anode de protection en magnésium et une trappe de visite, l'accumulateur sanitaire L est doté d'une jaquette isolante en polyuréthane dur avec feuillard de démontage.

L'accumulateur d'eau chaude a la particularité de pouvoir produire immédiatement de l'eau chaude d'au moins 60 ° C. L'eau est chauffée par un fluide caloporteur ou par une résistance électrique circulant dans un serpentín ou une boucle à plaques à l'intérieur du réservoir d'eau. Il est conservé à la température de consigne et réchauffé chaque fois que de l'eau est prélevée.



Figure 3.2: Schéma d'un accumulateur sanitaire

3.3.3 Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur absorbée par les capteurs solaires jusqu'aux échangeurs (sanitaire, chauffage et piscine s'il y a lieu).

Doté d'un fort pouvoir calorifique (proche de celui de l'eau), il est antigel (jusqu'à -35°C), anticorrosion, biodégradable et résiste aux hautes températures.

3.3.4 Rôle de ballon :

Le ballon est conçu, comme dans toutes les installations d'eau chaude sanitaire, pour atteindre un équilibre entre les pointes de demande et la puissance de charge lors de la préparation d'eau chaude et pour compenser dans les systèmes solaires les variations existant entre l'énergie solaire disponible et les besoins en eau chaude. En règle générale, il contient dans la partie inférieure un échangeur de chaleur dans lequel le fluide caloporteur (généralement un mélange d'eau et d'antigel) transfère l'énergie solaire du capteur vers le ballon.

En cas de besoin, la partie supérieure du ballon est réchauffée par un système de chauffage conventionnel de manière à ce que l'eau chaude récupérée dans la zone supérieure soit toujours à la température de consigne nécessaire, indépendamment de l'énergie solaire disponible. Les systèmes solaires de grande taille utilisent plusieurs ballons connectés en série, le dernier d'entre eux servant au réchauffement.

3.3.5 La pompe:

La pompe met le fluide en mouvement et règle son débit. Un dispositif de commande ou de régulation surveille l'état de fonctionnement de l'installation solaire et veille à une utilisation la plus efficace possible du rayonnement disponible. En cas de différence de température entre le ballon et le capteur, ce dispositif active la pompe de circulation dans le circuit du capteur et assure ainsi l'acheminement de la chaleur vers le ballon. Si la température du ballon est identique à celle de l'absorbeur, il n'est plus possible de délivrer de l'énergie au ballon et la pompe s'arrête.

3.3.6 Chauffage appoint :

En hiver ou lors de longue période de mauvais temps, la totalité de la production d'eau chaude ne peut être assurée par cette énergie solaire, un dispositif d'appoint (résistance ou serpentin) raccordé à une chaudière d'appoint prend donc le relais et reconstitue un

stock d'eau chaude, à notre système on utilise une chaudière à gaz, il est lui aussi directement connecté au ballon d'eau chaude.

3.4 Les étapes de simulation de T*SOL :

La simulation est faite, pour faire un dimensionnement précis d'une installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), ce logiciel permet de calculer les différentes puissances, le rendement du capteur, le taux de couverture, les différentes températures de l'eau dans la cuve du stockage au cours d'une année, et permet aussi de calculer les émissions de CO₂ en kg, pour cela, plusieurs données sont à connaître :

1. Les données techniques du capteur solaire :

- Le type de capteur.
- L'orientation et l'inclinaison du capteur.
- Les données climatologiques d'un endroit défini.
- L'irradiation de chaque mois.
- La surface de capteur.
- La température moyenne de chaque mois.

2. Les données techniques de l'installation eau chaude sanitaire (ECS) :

- Type de l'installation : deux échangeurs en série.
- Le volume du ballon du stockage.
- Les températures d'entrée et de sortie.
- Le type du chauffage d'appoint.

Notre travail consiste à étudier une installation solaire avec deux réservoirs en série.

3.5 Paramètres du système « deux réservoirs eau chaude sanitaire » :

Notre projet vise à assurer la production permanente d'eau chaude sanitaire ECS (4saisons), pour une maison individuelle, située à Tlemcen/Zenata, Ce système se compose de : des capteurs solaire plans, deux réservoirs en série, pompe, canalisation (circuit solaire), Chauffage d'appoint (chaudière à gaz).

3.5.1 Paramètres du capteur et le circuit solaire :

- ❖ Les données techniques du capteur plan :
 - Fabricant : Agila Solar Gmbh.

- Type : Agila FK 100.
- Désignation : capteur plan.
- Surface brute : 2.08m².
- Surface de référence : 1.9m².
- Capacité thermique spécifique : 2733J/m²k.
- Orientation : (sud) 180°.
- Angle d'azimut : 0°.
- Inclinaison d'installation : 40°.
- Objectif de couverture : moyen 70%.
- Nombre de capteurs :3.

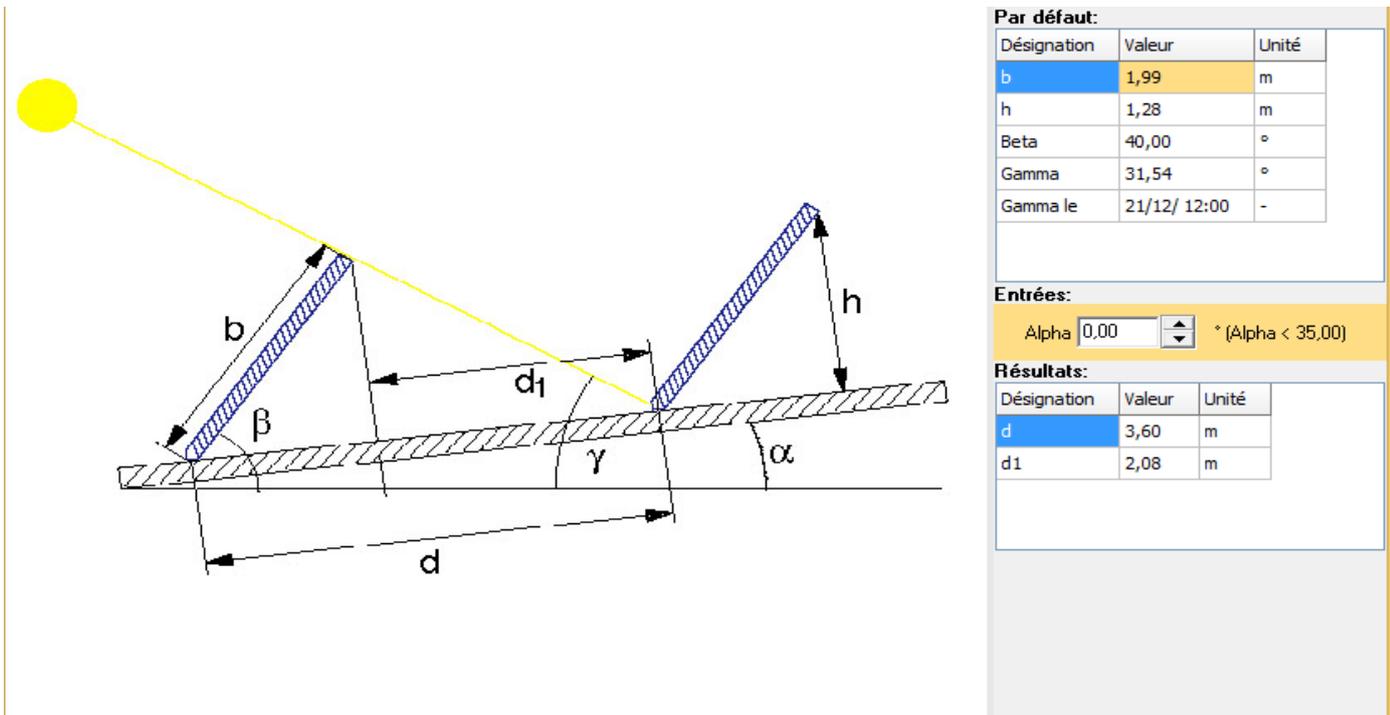


Figure 3.3: distance minimale des capteurs

- ❖ Les données techniques du premier réservoir de stockage :
 - Fabricant : Standard.
 - Type : Ballon ECS chauffé au solaire.
 - Volume : 350l.

- Hauteur=1.8m.
 - Epaisseur de l'isolation : 100mm.
 - Conduction thermique: 0.065w/ (m.k).
 - Pertes : 2.86kwh/jour.
 - Taux de perte thermiques : 2.65w/k.
- ❖ Les données techniques du deuxième réservoir de stockage :
- Fabricant : Standard.
 - Type : Ballon ECS.
 - Volume : 250lHauteur=1.8m.
 - Epaisseur de l'isolation : 100mm.
 - Conduction thermique: 0.065w/ (m.k).
 - Pertes : 2.50kwh/jour.
 - Taux de perte thermiques : 2.32w/k.
- ❖ Les données techniques du deuxième réservoir de stockage :
- Fabricant : Standard.
 - Type : Ballon ECS.
 - Volume : 250l.
 - Hauteur=1.8m.
 - Epaisseur de l'isolation : 100mm.
 - Conduction thermique : 0.065w/(m.k)
 - Pertes : 2.50kwh/jour.
 - Taux de perte thermiques : 2.32w/k.
- ❖ Circuit solaire :
- Débit volumique : 40 (l/h) /m² (par surface de capteur).
 - Eau-glycol : 20% polypropylenglycol.
 - Circuit solaire marche : 8K (sur la température de référence du réservoir).
 - Circuit solaire à l'arrêt : 3K (sur la température de référence du réservoir).

3.5.2 Le profil de la consommation :

- ❖ Consommation (relatif à la durée service) :

- Consommation journalière moyenne : 400l.
- Consommation annuelle : 146m³.
- Besoins annuels : 7066kwh.
- Consommation par heure maximale : 6.56kwh.

❖ **Températures :**

- Température consigne eau chaude : 60°C.
- Température de l'eau froide [16°C, 20°C].

❖ **Allure annuelle :**

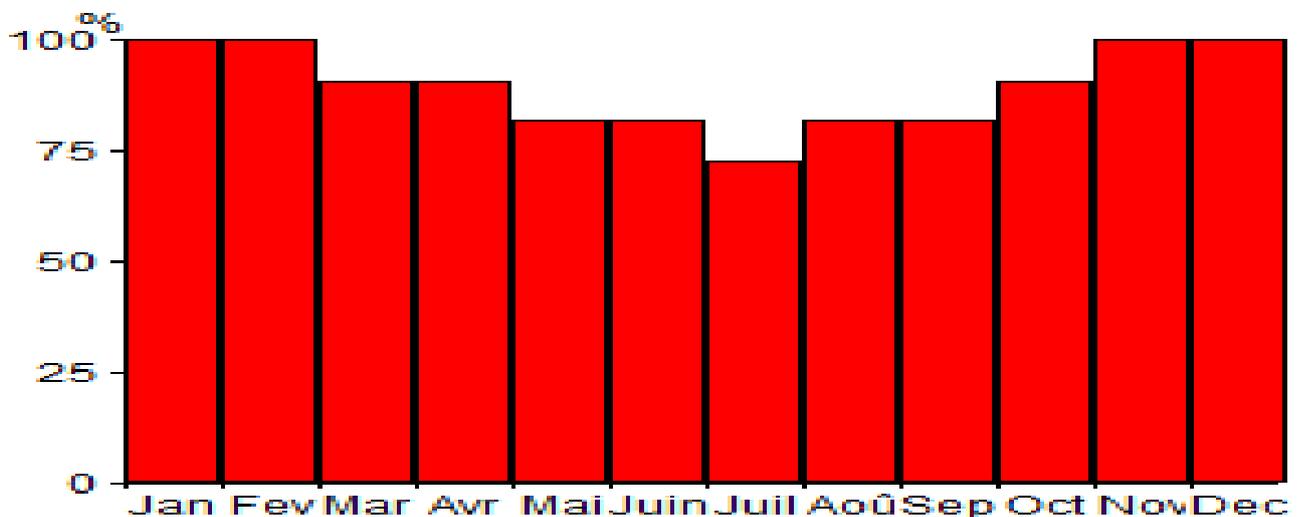


Figure 3.4: Allure annuelle de la consommation ECS

On constate d'après la figure 3.4 que la consommation de l'eau chaude sanitaire est plus importante pour les mois de Novembre, Décembre, Janvier, février (mois d'hiver dans la région), où la consommation est de 100% de ECS. Cela nous oblige à utiliser un autre système comme chaudière à gaz, pour aider à fournir de l'eau chaude sanitaire, car les mois d'hiver sont peu de source d'énergie solaire.

3.5.3 Etude de l'installation solaire :

Les données utilisées sont les conditions climatiques d'un habitat se trouvant dans le site de Tlemcen. On utilise le logiciel « météo syn » pour caractériser notre site (latitude, longitude, Rayonnement annuel global, l'humidité, la température ambiante, le flux diffus ...ect) de chaque mois.

Notre projet vise à fournir de l'eau chaude sanitaire (ECS) en permanence et à moindre coût, dans le but de réduire la consommation de gaz et d'électricité, en utilisant des moyens modernes et accessibles à tous comme : des capteurs solaire plans, deux réservoirs en série, pompe, canalisation (circuit solaire), Chauffage d'appoint (chaudière à gaz).

Cette installation est destinée pour :

- Transformation de l'énergie solaire irradiée en chaleur par le biais de capteurs.
- Acheminement de la chaleur à travers le réseau de conduites en direction du ballon.
- Stockage de la chaleur dans le ballon tampon jusqu'à ce que le consommateur en ait besoin.

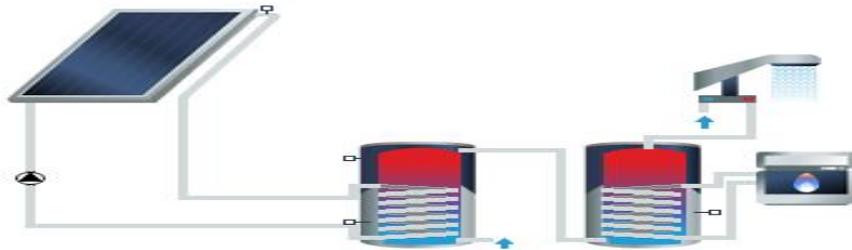


Figure 3.5: Installation ECS (2ballons)

3.6 Dépouillement des résultats de la simulation :

3.6.1 Rayonnement global horizontale (Irradiation horizontale kWh/m²) :

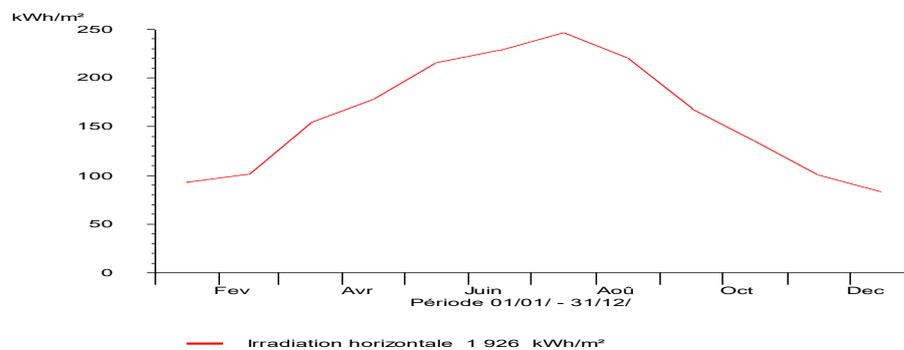


Figure 3.6: Irradiation horizontale

On remarque à travers la courbe graphique de la figure 3.6 que le rayonnement horizontal varie avec le changement de saison, où le rayonnement est important pendant la saison d'été et atteint une valeur maximale à la fin juillet 250Kwh/m^2 et diminue pendant les saisons d'automne. Et l'hiver, en raison de la formation de nuages et du manque de sources 'énergie solaire pendant l'hiver.

3.6.2 Position du soleil (azimut) :

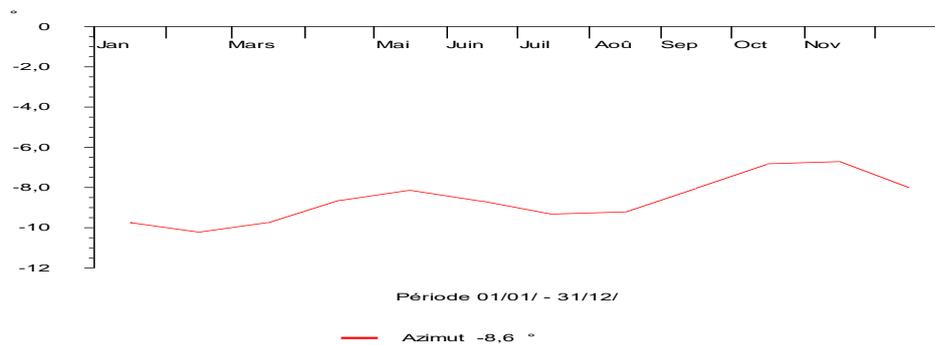


Figure 3.7: position du soleil (azimut)

Le graphique de la figure 3.7 montre que l'azimut de la région varie entre -8.0° et -10° pendant la durée des jours de l'année.

3.6.3 Débit volumique :

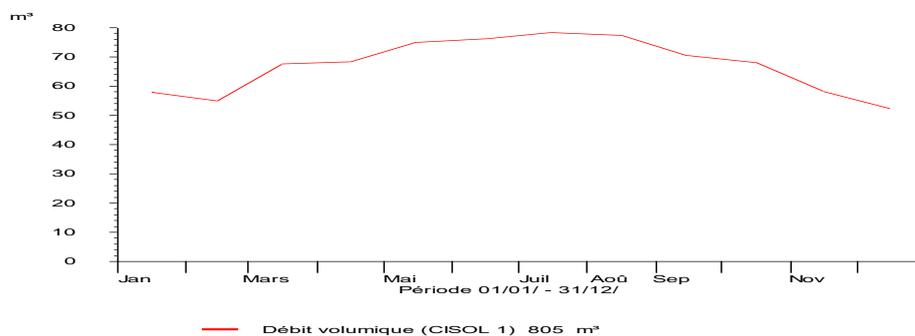


Figure 3.8: débit volumique

On constat d'après la courbe graphique de la figure 3.8 que le débit volumique augmente progressivement pendant l'été, atteignant une valeur de 80m^3 en raison de grande utilisation de l'eau en été pour la baignade et ainsi de suite, et il diminue progressivement pendant les saisons d'automne et l'hiver.

3.6.4 Taux de couverture ECS et la température ECS :

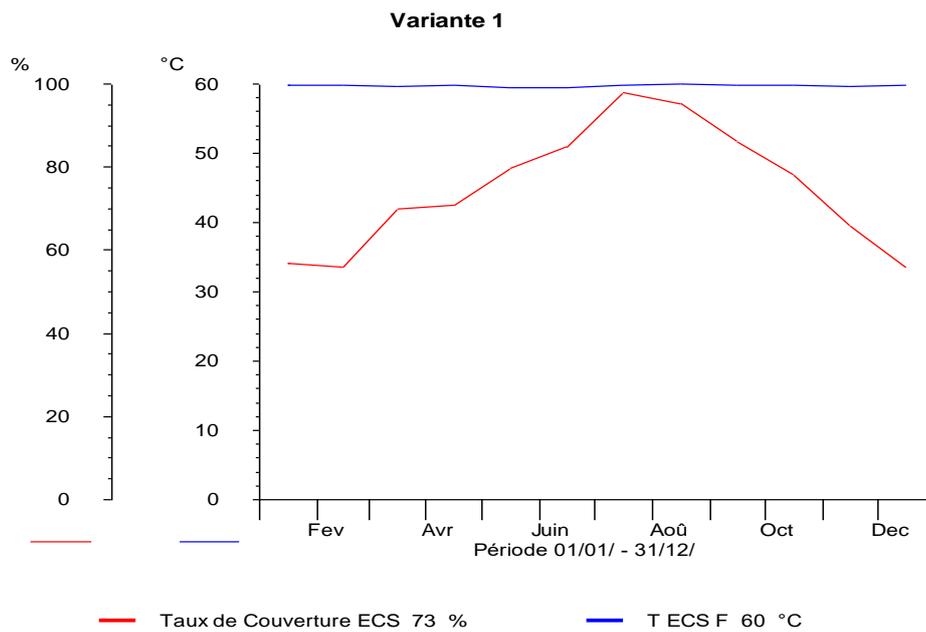


Figure 3.9: Taux de couverture ECS et la température ECS

Nous remarquons à travers le diagramme de figure 3.9 que la température de l'eau chaude sanitaire est toujours constante à 60 degrés pendant tous les jours de l'année, ce qui est une température très adaptée aux usages quotidiens et également une température à laquelle il n'y a pas de propagation de bactéries. En ce qui concerne la couverture en ECS, nous notons que: La couverture varie entre 35% et 73%, de sorte que le taux de couverture augmente pendant la saison de printemps et d'été, atteignant une valeur maximale d'environ 73% dans le mois de juillet, en raison du fait que les saisons d'été et de printemps sont de grandes sources d'énergie solaire et de la température élevée de ces mois. Les mois d'hiver, on constate une diminution progressive du taux de

couverture, due à la formation de nuages et à la rétention de température, ce qui entraîne une diminution des sources d'énergie solaire.

3.6.5 Energie fournie pour le chauffage d'eau sanitaire :

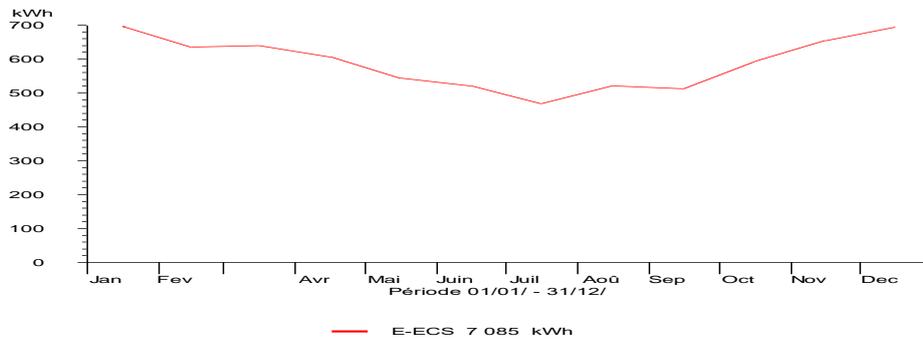


Figure 3.10 : Energie fournie pour le chauffage d'eau sanitaire

La figure 3.10 montre que l'énergie fournie pour le chauffage d'eau sanitaire en hiver et en automne est d'environ 700kwh, en raison de la froideur de la région pendant ces saisons et de sorte que la demande d'eau chaude est grande. Pendant les 1 mois d'été, nous avons besoin d'environ 500 kWh.

3.6.6 Energie système solaire pour l'ECS et le Besoins énergétique Réchauffement et la consommation de l'ECS:

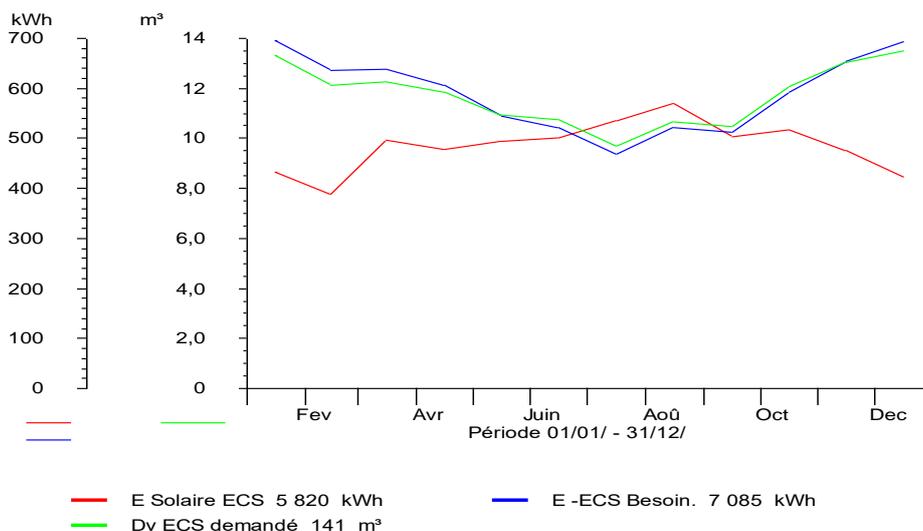


Figure 3.11: diagramme de l'énergie solaire ECS et la consommation d'ECS et et le Besoins énergétique réchauffement

On remarque à travers la figure 3.11 qu'il y a une différence et une contradiction directe entre l'énergie solaire du système et la demande en eau chaude sanitaire pendant les périodes de l'année, de sorte que l'énergie solaire du système augmente entre les mois de printemps et d'été pour atteindre une valeur maximale d'environ 5820 kWh pendant la saison d'août, et diminue pendant la saison d'hiver, contrairement à la consommation d'eau chaude sanitaire, de sorte que la demande d'eau chaude ECS est importante pendant la saison hivernale jusqu'à ce que la demande atteigne environ 141 m³, en raison à la froideur de la région en hiver.

3.6.7 Rayonnement global spécifique sur la surface inclinée et la température moyen de capteur :

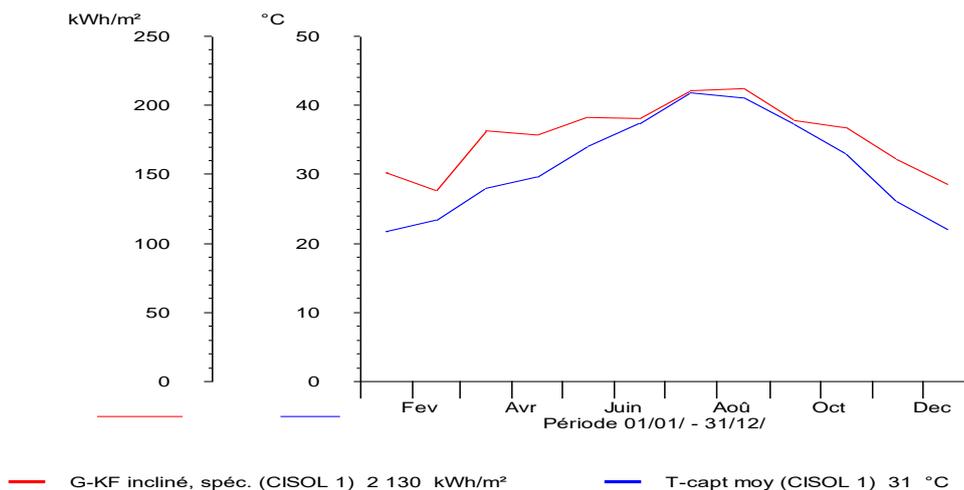


Figure 3.12 : Rayonnement global spécifique sur la surface inclinée et la température moyen de capteur

D'après la figure 3.12 : le rayonnement global spécifique sur la surface inclinée et la température moyen de capteur. Diminuent pendant l'hiver, et augmentent légèrement pendant le printemps, et durant l'été ils atteignent leurs valeurs maximums respectivement 210 kWh/m et 40°C, puis ils diminuent au cours de l'automne et l'hiver.

3.6.8 Température maximale journalière dans le capteur :

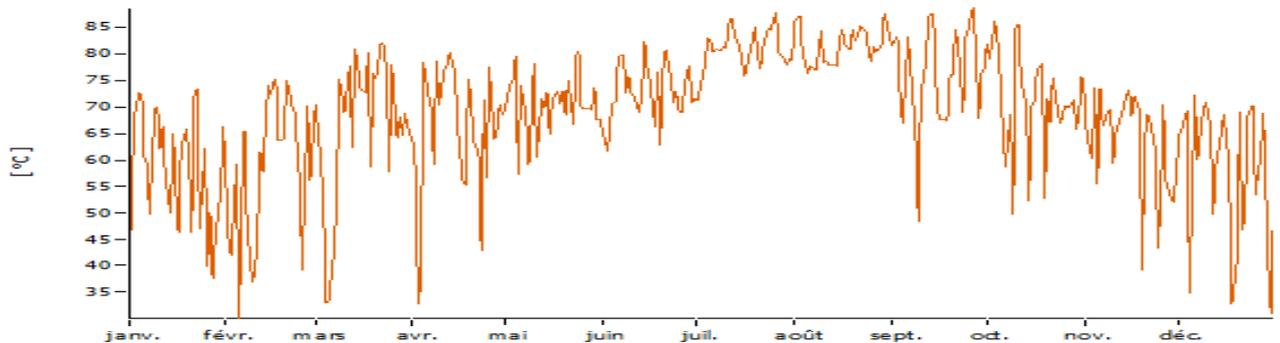


Figure 3.13 : Température maximale journalière dans le capteur

On remarque d'après la Figure 3.13 que la Température maximum journalière dans le capteur est atteinte pendant l'été.

3.6.9 Pertes thermiques des capteurs et les pertes tuyauterie extérieur et intérieur :

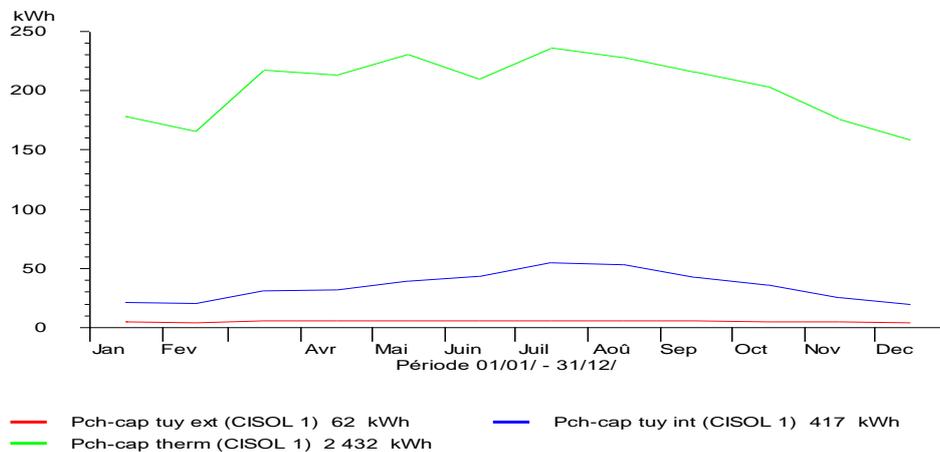


Figure 3.14 : Pertes thermiques des capteurs et les pertes tuyauterie extérieur et intérieur

D'après la figure 3.14, On remarque que les pertes thermiques dans le capteur plan est plus importante (environ de 250kwh), par rapport à les pertes dans la tuyauterie, elle très faible, entre 0et 50 kWh, cette différence est due à l'énergie inversée ou réfléchi de capteur vers l'ambiant.

3.6.10 Pertes thermiques des deux ballons ECS :

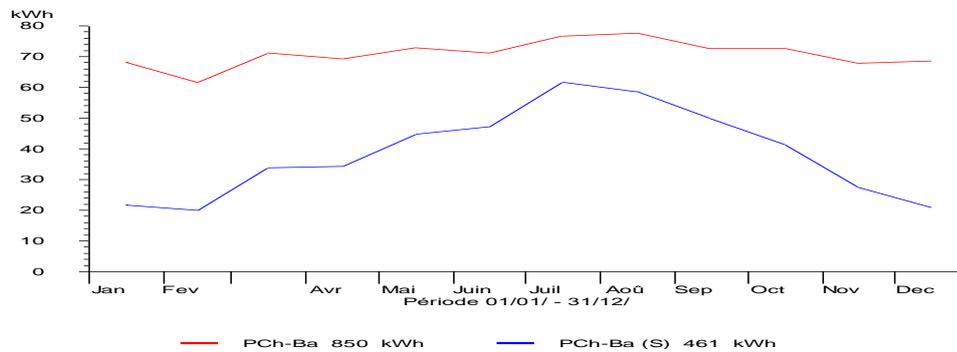


Figure 3.15 : Pertes thermiques des deux ballons ECS

D’après la figure 3.15, on remarque que les pertes thermiques dans le premier réservoir (75kwh) sont supérieures aux pertes thermiques dans le deuxième réservoir (50kwh)

3.6.11 Emission de CO₂ évitée :

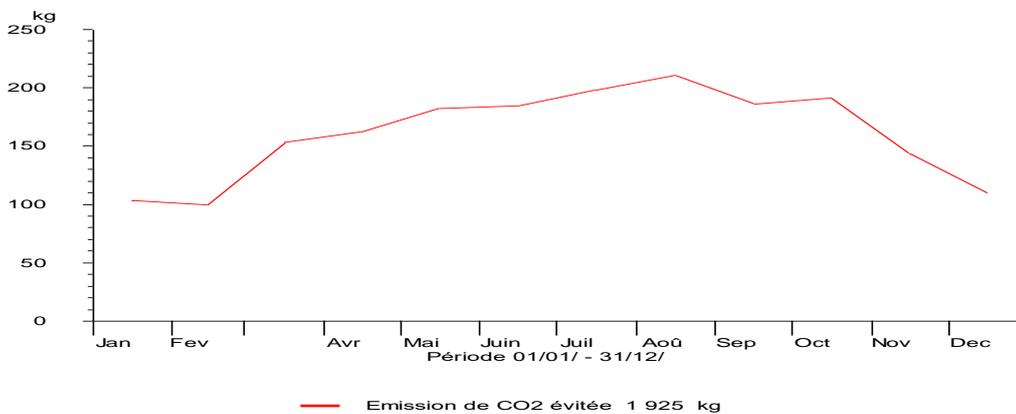


Figure 3.16 : Emission de CO₂ évitée

L’émission de CO₂ évitée est réduite pendant l’hiver et forte pendant l’été. Ce qui amène à dire que l’énergie solaire participe à la diminution de la pollution de l’environnement.

3.6.12 Consommation de gaz naturel :

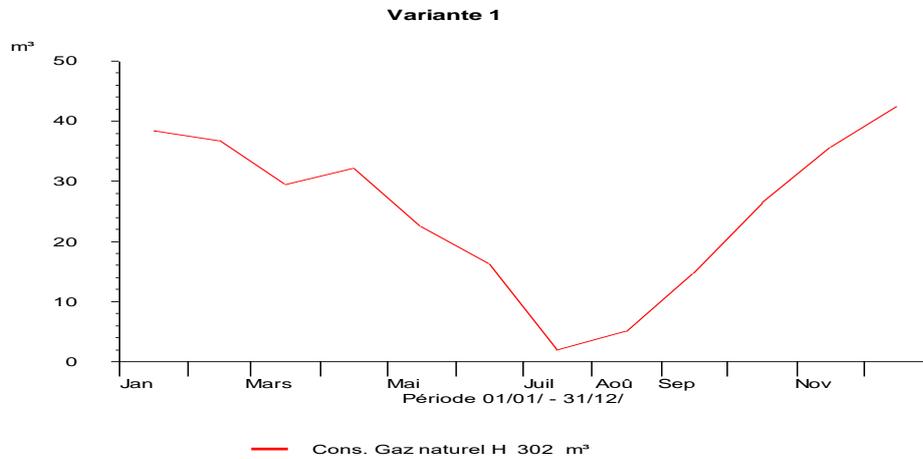


Figure 3.17: consommation de gaz naturel

D'après la figure 3.17, La consommation de gaz naturel est forte pendant les mois de Janvier et Février, et réduite pendant le printemps et l'hiver.

3.6.13 Economie de gaz naturel :

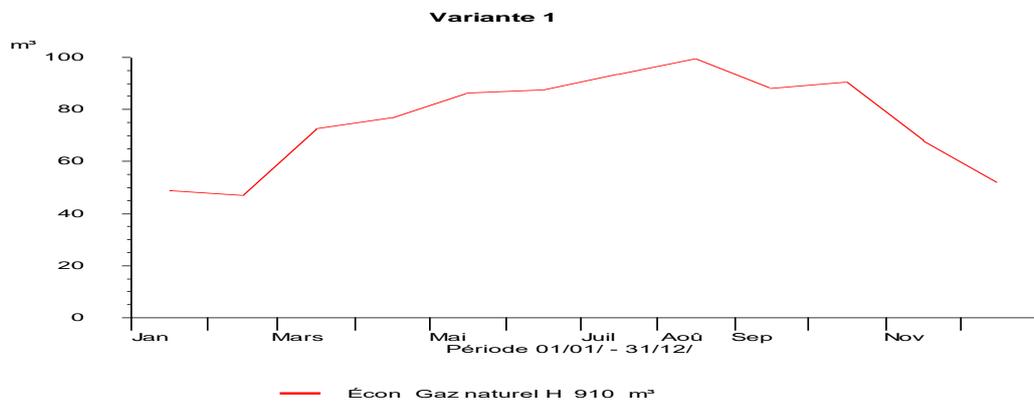


Figure 3.18 : Economie de gaz naturel

On observe d'après la figure 3.18 l'économie de gaz naturel diminue légèrement pendant Janvier et Février, et à partir du mois de Mars elle commence à augmenter jusqu'à le mois d'Octobre, après elle diminue à partir du mois de Novembre.

3.6.14 Rendement de système :

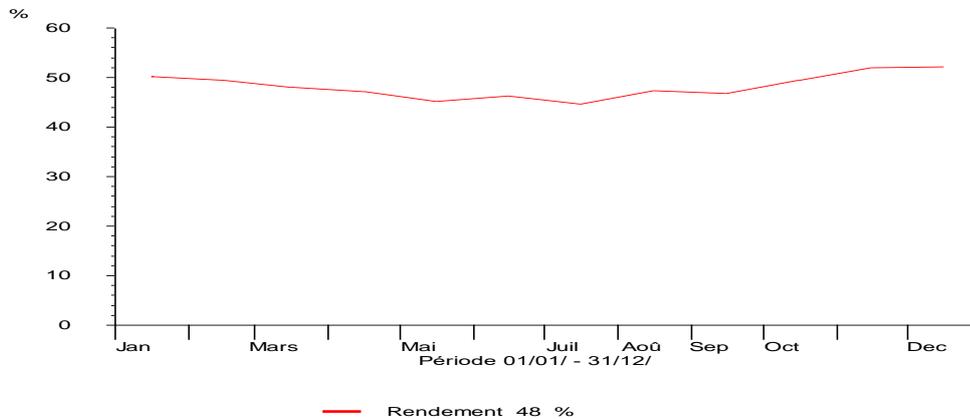


Figure 3.19 : Rendement de système

Le rendement du système est constant égale à 48% durant l’année.

3.6.15 Résultat de variation de ballon :

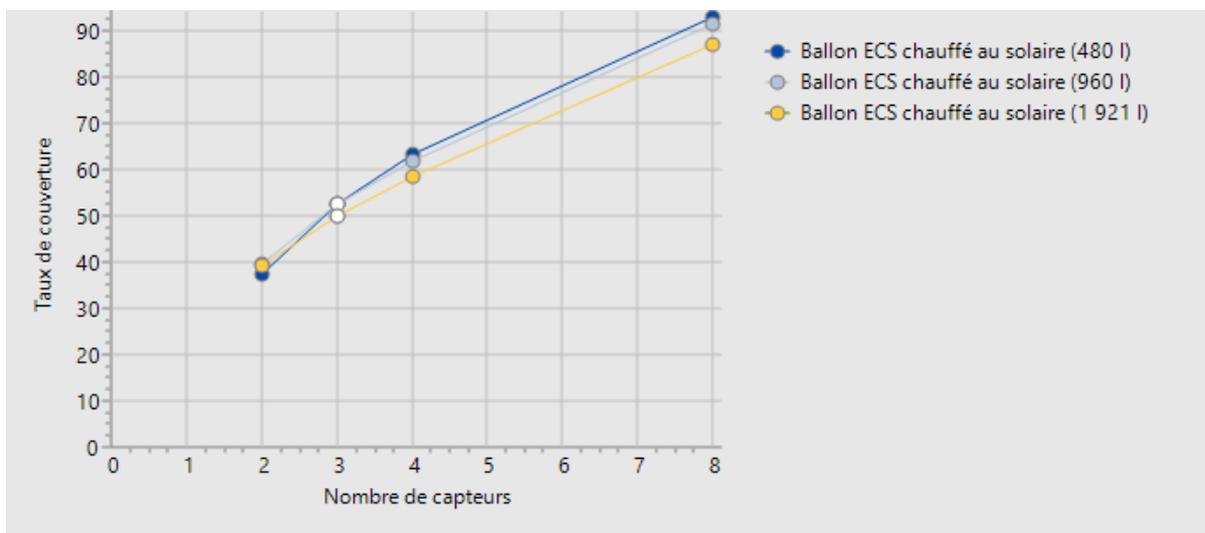


Figure 3.20: Résultat de variation de ballon

La figure 3.20 représente le taux de couverture en fonction de nombre de capteurs, on l’on note que plus le volume du réservoir est petit, plus le taux de couverture est grand et répond aux besoins, et pour cela il ne faut pas exagérer l’augmentation du volume du réservoir pour Une meilleure utilisation.

3.7 Résultats de la simulation annuelle :

- Puissance installée : 4.37 kW.
- Surface de capteur installée (brute) : 6.24m².
- Irradiation sur la surface du capteur (surface de réf) : 12138.28kwh
-2129.52kwh/m².
- Energie délivrée par les capteurs : 6762.39kwh-1186.38kwh/m².
- Energie délivrée par le circuit de capteurs : 6282.92kwh-1102.27kwh/m².
- Energie fournie pour le chauffage eau chaude sanitaire : 7084.81kwh.
- Energie système solaire pour l'ECS : 5820.40kwh.
- Apport d'énergie pour l'appoint : 2114.1kwh.
- Economie Gaz naturel H : 910.2m³.
- Emission de CO₂:1924.70kg.
- Taux de couverture eau chaude : 73.4%.
- Energie économisé relative d'énergie supplémentaire : 72.9%.
- Rendement de système : 48.0%.

3.8 Schéma de bilan énergétique :

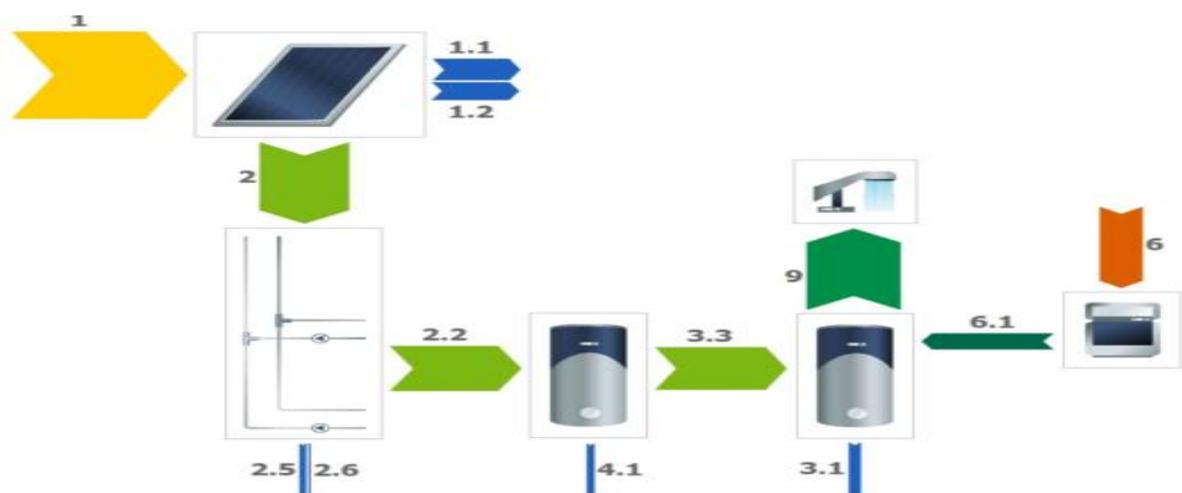


Figure 3. 21: schéma de bilan énergétique

- 1 : Irradiation sur la surface du capteur (surface de réf) :12138kwh.
- 1.1 : Pertes optiques sur les capteurs : 2944kwh.
- 1.2 : Pertes thermique des capteurs : 2432kwh.
- 2 : Energie du champ de capteurs : 6762kwh.
- 2.2 : Energie solaire au ballon de préchauffage : 6283kwh.
- 2.5 : Pertes sur la tuyauterie intérieure : 417kwh.
- 2.6 : Pertes sur la tuyauterie extérieure : 62kwh.
- 3.1 : Pertes ballon : 850kwh.
- 3.3 : Ballon de préchauffage au réservoir : 5820kwh.
- 4.1 : Pertes ballon (s) :461kwh.
- 6 : Energie finale : 3146kwh.
- 6.1 : Energie supplémentaire au réservoir : 2114kwh.
- 9 : ECS-énergie du réservoir : 7085kwh.

3.9 Conclusion :

A travers une étude des résultats de la simulation, il s'est avéré que l'apport du système d'énergie solaire, qu'il soit à long ou à court terme, il nous permet d'économiser de l'argent et de l'énergie, car c'est un système facile à installer et peu coûteux. Il couvre une grande partie des besoins de nos ménages, que ce soit pour fournir de l'eau chaude ou du chauffage, et il réduit également la pollution ce qu'il fait de lui un système écologique. De plus, les systèmes d'énergie solaire sont très utiles pour les personnes et les familles vivant en milieu rural où Il n'y a pas de réseau de gaz naturel et d'électricité, car cela a réduit beaucoup de souffrances, d'autant plus que les prix du gaz naturel et de l'électricité ont augmenté. Tous ces paramètres rendent l'usage de ce système est considérée comme l'une des solutions à l'utilisation de sources d'énergie alternatives.



Conclusion Général

Conclusion Général

Notre travail s'appuie sur des recherches théoriques sur les installations solaires, qui servent à produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage d'une habitation situé à Tlemcen (Zenata) tout au long de l'année.

Pour la réalisation de la simulation de l'installation, nous avons utilisé le logiciel T*SOL qui donne les paramètres et les dimensionnements de chaque élément de l'installation utilisée, et Il permet une présentation rapide de l'installation solaire incluant les estimations en termes de rendement et de rentabilité correspondantes et aussi le logiciel météo qui donne les paramètres climatiques du site Tlemcen.

Les calculs effectués nous rapprochent des valeurs de la demande particulière de chauffage au cours de l'année, ainsi que de la quantité de consommation d'eau chaude sanitaire et du taux de couverture des besoins, ainsi que la quantité consommée de gaz naturel ou d'électricité.

On constat d'après cette étude que les besoins en chauffage sont plus importants pour les mois de Décembre, Janvier et Février (saison hivernale), et nous concluons également qu'il existe une relation inverse, entre le besoins en énergie solaire thermique pour le chauffage, et la présence d'une source d'énergie solaire pendant l'hiver, ça veut dire que Le fait qu'on ait le plus besoin de soleil au moment où il est le moins disponible constitue évidemment le principal handicap du chauffage solaire. Cela nous oblige à utiliser des techniques de stockage comme solution.

Concernant la production d'eau chaude sanitaire, une température ne dépassant pas les 60°C est largement suffisante avec 3 capteurs solaires plans. Le système de régulation de l'installation nous permet d'avoir une température constante dans le ballon de stockage. Avec une surface de captage de 2.08m² et un volume de stockage de 400l, l'appoint est nécessaire pendant la période de chauffe.

Au final on peut dire qu'un système d'énergie solaire, il nous permet d'économiser de l'argent et de l'énergie, car c'est un système facile à installer et peu coûteux. Il couvre une grande partie des besoins de nos ménages, et chauffage.

Donc ce système est considéré comme l'une des solutions à l'utilisation de sources d'énergie alternatives

Références bibliographiques

[1] : <https://www.academia.edu> consulté le : 05/04/2021

[2] : Mémoire de fin d'étude thème « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque » Seif Eddine NAFFOUTI université libre de Tunis juin 2012

[3] : <https://www.memoireonline.com> consulté le : 05/04/2021

[4] : Mémoire de fin d'étude thème « Etude d'un système solaire avec réservoir bivalent pour le chauffage d'habitat » MEKKI Dahbia TAHRI Fatima Zohra université Abou bekr belkaide 2 juillet 2012

[5] : www.retscreen.net consulté le : 06/04/2021

[6] : <http://chauffe-eau-solaire.durable.com/> consulté le : 07/04/2021

[7] : A. Dahmani, « Modélisation thermique d'un capteur solaire plan à eau », thèse d'initiation à la recherche, Batna 2008-2009

[8] : <https://www.futura-sciences.com/> consulté le : 07/04/2021

[9] <https://www.laprimeenergie.fr/> consulté le : 07/04/2021

[10] : Mémoire de fin d'étude thème *Dahmani Aissam et Souidi Sofiane* « Modélisation des capteurs solaires plans à air munis des ailettes et des chicanes » 2015 université Abou bekr belkaide

[11] : <https://www.quelleenergie.fr> consulté le : 08/04/2021

Références bibliographiques

[12] : <https://lenergie-solaire.net/> consulté le : 08/04/2021

[13] : <https://bu.umc.edu.dz/> consulté le : 08/04/2021

[14] : Mémoire de fin étude « LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE » Présenté par : BHAM SARA HAMROUDEN HAMZA JUIN 2018 université Mohammed V de Rabat.

[15] : <https://www.fondation-lamap.org/fr/> consulté le : 11/04/2021

[16] : *Mémoire de fin étude* « Etude d'une installation solaire pour une Maison individuelle dans le site de Tlemcen » *Présenté par* : Melle BEKHECHI Nihel 2013 université Abou bekr belkaide

[17] : *Mémoire de fin étude* « Les stratégies d'énergie solaire dans l'habitat bioclimatique » Présenté par : Berrah Widad et Mesbahi Amira 2015 université E L'ARBI BEN M'HIDI. OUM EL BOUAGHI

[18] : Mémoire de fin étude « Conception de bâtiments solaires. Méthodes et outils des architectes dans les phases initiales de conception » Émilie Bouffard, 2013 université Laval Québec, Canada

[19] : <https://www.systemed.fr/> consulté le : 13/04/2021

[20] : <http://www.chauffe-eau-solaires.net/antigel/> consulté le : 13/04/2021

[21] : (cahier des clauses techniques particulières) : projet de recherche et développement MeGaPICS (projet ANR)

Références bibliographiques

[22] : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE par LAGHZAOUÏ (Amine) PEERHOSSAINI (Donia) thème « STOCKAGE DE CHALEUR : ENERGIE SOLAIRE ET AUTRES APPLICATIONS » ECOLE DES MINES DE DOUA.

[23] : thème « Etude d'un système de stockage d'énergie solaire thermique répondant aux besoins en chauffage d'une habitation unifamiliale » de Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine. Auteur 'Gatellier, Baptiste' année 2018-2019

[24] : <https://matheo.uliege.be/> consulté le : 18/04/2021

[25] : <http://cdoc.ensm-douai.fr> consulté le : 22/04/2021

[26] : thème « Etude d'un système de stockage d'énergie solaire thermique répondant aux besoins en chauffage d'une habitation unifamiliale » de Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine. Auteur 'Gatellier, Baptiste' année 2018-2019

[27] : thème « Stockage inter-saisonnier d'énergie solaire pour l'habitat – performance du procédé en fonction du couple d'absorption » Laboratoire LOCIE, Université de Savoie Polytech'Savoie, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget Du Lac, France

[28] : <https://www.xpair.com/> consulté le : 23/04/2021

[29] : <https://www.xpair.com/lexique/> consulté le : 23/04/2021

[30] : « Conception et Simulation Dynamique d'installation solaires thermiques » l'auteur Dr. Gerhard Valentin Berlin-2003