

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

Étude des performances thermiques d'un chauffe eau solaire, muni d'un récepteur fabriqué à base de canettes de soda.

Réalisé par:

BENCHABANE Amine

BELKHIER Haroun

Encadré Par :

Mme. A. AICHOUBA

Membre du jury :

M. O. KETFI

Mme. N.HATRAF

Président du jury

Examinatrice

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

Tous d'abord nous remercions Dieu, de nous avoir guidé et nous avoir donné la force d'accomplir ce travail.

Je remercie également ma famille pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que je termine mes études.

Nous tenons à exprimer tous nos plus vifs remerciements à notre promotrice Mm. ASMA AICHOUBA pour ses conseils éclairés et ses remarques judicieuses, qui nous ont permis de terminer ce travail.

Nous tenons à remercier Mr BELGROUN ZOUBIR et Mr HANI BELTAGY pour leur aide précieuse.

Au membre de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants d'énergétique qui ont contribué a notre formation.

Nous voudrions aussi exprimer toute notre gratitude et nos remerciement à tous ceux ou celles qui nous ont apporté soutient ou aide moral, trouve ici l'expression de nos remerciement les plus distingués.

Dédicace:

Je dédie ce travail à mes très chers Parents, pour leur soutien et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et je leur souhaite bonne santé et longue vie.

A mon frère Mohamed, et mes sœurs Nadjat et Wissem et Amina A Toute Ma Famille

A Mes très chers Amis : Oussama, Taki , Yasser ,Walid .

Tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

ملخص

عملنا الحالي هو دراسة الأداء الحراري لمجمع حراري شمسي مسطح مزود بجهاز استقبال علب الصودا هذا من أجل تقييم ربحية مثل هذا الجهاز و الذي يمكن تصنيعه من منتجات مستردة.

تتضمن دراستنا محاكاة باستخدام البرنامج (SAM). solar advisor MODEL. و النمذجة باستخدام الأداة الرقمية (MATLAB) تم اختيار نموذج مستشعر لوحة مسطحة متاح تجاريا (DUROTHERM) لمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من الأخير مع نتائج مستشعر علب الصودا. في الجزء الأول، تم تطبيق المحاكاة على جهازي الاستشعار وتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها، سمحت المحاكاة بتخطيط منحنيات الطاقة والعائد المفيد بدلالة للوقت الشمسي الحقيقي. كانت قيم الطاقة و العائد المفيد لجهاز الاستشعار التجاري أعلى من قيم مستشعر العلب وهي نتيجة كانت متوقعة ويمكن تبريرها بالقطر الكبير لعلب الصودا مقارنة بقطر أنابيب الاستقبال لجهاز الاستشعار التجاري مما تسبب في خسائر حرارية أكبر. وفي الجزء الثاني وفي إطار نضام دائم أجريت نمذجة الأداء الحراري وطبقت بإدخال الخصائص الفيزيائية لجهاز الاستشعار ولم تكن النتائج التي تم الحصول عليها متسقة مع نتائج المحاكاة. ويرجع ذلك إلى المعلمات المبسطة التي أهملها البرنامج (MATLAB) وأيضاً بسبب انواع المعادلات المستخدمة في البرمجة.

Résumé:

Le présent travail consiste en une étude des performances thermiques d'un capteur solaire thermique plan, muni d'un récepteur à canettes de soda. Ceci dans le but, d'évaluer la rentabilité d'un tel dispositif, pouvant être fabriqué à base de produit de récupération.

Notre étude comporte une simulation, réalisée à l'aide du logiciel (SAM), Solar Advistor Modal, et une modélisation réalisée à l'aide de l'outil numérique (MATLAB). Un modèle de capteur plan, issu du commerce (DUROTHERM) a été choisi, afin de comparer les résultats obtenus à partir de ce dernier et ceux du capteur à récepteur à canettes de soda. Dans une première partie la simulation a été appliquée pour les deux capteurs et les résultats obtenus ont été comparés, la simulation a permis le traçage des courbes de puissances utiles et de rendement en fonction du temps solaire vrai. Les valeurs de la puissance utile et du rendement du capteur commercial ont été plus élevées que ceux du capteur à caquettes, un résultat qui était attendu et peut être justifié par le diamètre important des canettes de soda par rapport au diamètre des tubes récepteurs du capteur commercial, provoquant ainsi des pertes thermiques et des pertes de charge plus importantes. Dans une deuxième partie et sous un régime permanent, la modélisation du rendement thermique a été réalisée et appliquée en introduisant les caractéristiques physiques des deux capteurs, les résultats obtenus ne concordaient pas avec ceux de la simulation. Ceci est dû aux paramètres simplifiés et négligés par le programme réalisé sous MATLAB et aussi dû aux types d'équations utilisés dans la programmation.

Mots clés: capteur solaire plan, chauffe eau solaire, capteur solaire thermique, modélisation d'un capteur solaire, SAM, rendement chauffe-eau solaire.

SUMMARY:

The present work consists of a study of the thermal performance of a flat solar thermal collector, equipped with a soda can receiver. This is in order to evaluate the profitability of such a device, which can be manufactured on the basis of recovery product.

Our study includes a simulation using the software (SAM), Solar Advistor Modal, and a modelling using the digital tool (MATLAB). A commercially available flat plate sensor model (DUROTHERM) was chosen in order to compare the results obtained from the latter with those of the soda can receiver sensor. In the first part the simulation was applied for the two sensors and the results obtained were compared, the simulation allowed the plotting of useful power and yield curves as a function of true solar time. The useful power and efficiency values of the commercial sensor were higher than those of the caquette sensor, a result that was expected and can be justified by the large diameter of soda cans in relation to the diameter of the receiver tubes of the commercial sensor, thus causing greater thermal losses and load losses. In a second part and under a permanent regime, thermal performance modelling was carried out and applied introducing the physical characteristics of the two sensors, the results obtained were not consistent with those of the simulation. This is due to the simplified parameters neglected by the program made under MATLAB and also due to the types of equations used in programming.

Tags: solar collector plan, solar water heater, solar thermal collector, solar collector modelling, SAM, solar water heater efficiency.

Nomenclature

Symboles	Designations	Unités
C_{pi}	Chaleur massique à pression constante	j/Kg.°C
e_i	Epaisseur d'un corps	m
hc_{ij}	Coefficient d'échange thermique par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W/m ² .°C
hr_{ij}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W/m ² .°C
G	Rayonnement global incident	W/m ²
M_i	Masse d'un corps d'indice i	Kg
P_i	Puissance solaire absorbée par un corps d'indice i	W/m ²
Qc_{ij}	Flux de chaleur échangé par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
Qr_{ij}	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
Qcd_{ij}	Flux de chaleur échangé par conduction entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
T_i	Température d'un corps d'indice i	°C
V	Vitesse du vent	m/s
G	Accélération de la pesanteur	m ² /s
S_i	Surface d'un corps d'indice i	m ²
Δ	La déclinaison	Degré
Ω	L'angle horaire	Degré
L	Latitude de lieu	Degré
Ψ	Longitude de lieu	Degré
a	L'azimut	Degré

Tsv	Temp solaire vrai	Heures
J	Nombre de jour de l'année	Jours

Indices

e
f
s
t
u
i
abs
am
v
a

Désignation

Entrée
Fluide
Sortie
Tube
Utile
Isolant
Absorbeur
Ambiant
Vitrage
Air

Letters grecques

α
 ρ
 τ
 δ
 ξ
Q
 φ
 β
 η
 μ

Designation

Coefficient d'absorption
Coefficient de reflexion
Coefficient de transmission
declination
emissivity
Flux de chaleur
Densité de flux de chaleur
Inclinaison du capteur
Rendement instantané
Viscosité dynamique

Unite

Sans unité
Sans unité
Sans unité
Degré
Sans unite
 W/m^2
 W/m^2
Degré
Sans unité
 $Kg/m.s$

Sommaire

Chapitre I : Gisement solaire

I-1 Introduction :	16
I-2 Historique et chronologie	16
I-3 Gisement Solaire :	17
I-4 Géométrie Terre-Soleil :	18
I-4-1 Les coordonnées horaires :	18
I-4-1-1 La variation de la déclinaison du soleil :	18
I-4-1-2 Angle horaire:	18
I-4-2 Les coordonnées horizontales:	19
I-4-2-1 Hauteur du soleil :	19
I-4-2-2 Azimut du soleil.....	19
I-4-3 Les coordonnées géographiques:	20
I-4-3-1 La latitude :	20
I-4-3-2 La longitude :	20
I-5 La constante solaire :	20
I-6 Les temps solaires [4] :	21
I-7 La déclinaison solaire :	22
I-8 Structure et composition de l'atmosphère :	22
I-9 L'effet de l'atmosphère :	23
I-9-1 Émissions solaire :	24
I-9-2 Émissions terrestres :	25
I-9-3 Deux autres termes existent :	25
I-10 Le rayonnement solaire au sol :	25
I-11 Modélisation de l'éclairement solaire :	26
I-11-1 Modèle de Perrin de Brichambaut :	26
I-12 Potentiel solaire en Algérie [11] :	27
I-13 Conclusion :	28
Chapitre II : Généralités sur les chauffe-eau solaires	
II-1 Introduction:	30
II-2 Définition de chauffe-eau solaire :	30
II-3 Les composants d'un chauffe-eau solaire :	30
II-3-1 Le Capteur solaire plan :	31
II-3-1-1.Éléments de construction.....	31

II-3-2 La cuve de stockage :.....	35
II-4 Le principe de fonctionnement d'une installation solaire à chauffe-eau solaire.....	36
II-5 Les types de chauffe-eau solaire	38
a. Le Chauffe-eau solaire monobloc.....	38
b. Le chauffe-eau solaire plan à "thermosiphon"	38
c. Le Chauffe-eau stockeur	39
d. Le Chauffe eau solaire à éléments séparés.....	40
e. Les chauffe-eau à circulation forcée [16]	41
f. Les chauffe-eau à auto vidange [17]	42
II-6 Avantages et inconvénients d'un chauffe-eau solaire :.....	43
II-6-1 Les avantages d'un chauffe-eau solaire sont nombreux, en voici les principaux :.....	43
II-6-2 Les inconvénients sont entre autres :	43
II-7 Conclusion :	43
Chapitre III: Modélisation thermique de chauffe-eau solaire (CES)	
III-1 Introduction:	45
III-2 : Modélisation d'un capteur solaire plan :.....	45
III-2-1- Hypothèses	45
III-2-2- Bilan thermique et énergétique d'un capteur solaire plan :	45
III-3 Rendements d'un capteur solaire [20] :	47
III-4- évaluation des pertes thermiques au niveau des différents : constituants :	48
III-4-1 Pertes thermiques [20] :	48
III-5 Détermination du profil de température de la paroi absorbante.....	52
III-5-1 Profil de température dans la direction OY	52
III-5-2 Calcul du flux utile	53
III-5-3 Calcul du rendement instantané [19]:.....	53
III-6 Conclusion :	54
Chapitre IV: Simulation et Résultats	
IV-1-Introduction:	56
IV-2-Simulation du chauffe-eau solaire par le logiciel 'SAM' :.....	56
IV-2-1-présentation du chauffe-eau simule :	56
IV-2-2 présentation de logiciel de simulation :	57
IV-2-3-Présentation du site :	58
IV-2-4 Détail de la Simulation des chauffe-eau solaires par 'SAM' :.....	58
IV-2-5 Résultats de la simulation à l'aide du logiciel SAM :	59

IV-2-5-1 Variation des puissance en fonction du temps solaire vrai :.....	59
IV-2-5-2 Variation du rendement thermique en fonction du temps solaire vrai :.....	64
IV-3 Modélisation des performances thermiques du capteur solaire plan à l'aide de l'outil numérique MATLAB :	68
IV-3 -1 Résultats de la modélisation sous langage MATLAB :.....	70
IV-3 -1-2 Courbes de rendements en fonction du temps solaire vrai:	74
IV-4 -Conclusion :.....	76
CONCLUSION GENERALE :.....	77

Liste des figures :

Figure I-1 : Variation de la déclinaison du soleil au cours du mouvement de la terre autour de soleil.....	18
Figure I-2 : Schéma descriptif pour les angles azimut et hauteur solaire.....	19
Figure I-3: Schéma descriptif pour les angles latitude et longitude de la terre.....	20
Figure I-4: Trajectoire – écliptique – déclinaison.....	22
Figure I-5: Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol.....	23
Figure I-6 : Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère	24
Figure I-7: Variation de l'irradiation arrivant sur terre en fonction de sa longueur d'onde.....	26
Figure I-8: Atlas solaire Algérien.....	27
Figure II-1: Composants d'un capteur solaire plan vitré.....	31
Figure II-2: Absorptivité et émissivité de divers types de revêtements	33
Figure II-3: Diverses formes d'absorbeurs	34
Figure II-4: La cuve de stockage avec échangeur.....	36
Figure II-5 : Schéma général du fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.....	37
Figure II-6: Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact).....	38
Figure II- 7: Le chauffe-eau à thermosiphon.....	39
Figure II-8 : Chauffe-eau stockeur.....	40
Figure II-9 : Chauffe-eau solaire à éléments séparés.....	41
Figure II-10: Système à circulation forcée.....	42
Figure II-11 : Les chauffe-eau à auto vidange.....	42
Figure III-1: Schéma montrant les échanges thermique avec le milieu extérieur.	45
Figure III-2: Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert.....	48
Figure III-3 : Schéma électrique équivalent des transferts thermiques.....	50
Figure III-4: Schéma en coupe de l'absorbeur.....	52
Figure IV-1 Figure IV-1 schéma montrant la forme du capteur à canettes de soda.....	57
Figure IV-2 : Page de démarrage du logiciel« SAM ».....	57
Figure IV-3: Courbe de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (21mars).....	59
Figure IV-4: Courbe de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (22juin).....	60

Figure IV-5: Courbe de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (23 septembre).....	61
Figure IV-6: Courbe de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (22 décembre).....	61
Figure IV-7: Courbe de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (22 juillet).....	62
Figure IV-8: Courbe de puissance en fonction du temps solaire vrai de (moyenne annuelle).....	63
Figure IV-9: Courbe de rendement pour la journée type du 21 Mars.....	64
Figure IV-10: Courbe de rendement pour la journée type 22 Juin.....	65
Figure IV-11: Courbe de rendement pour la journée type 23 Septembre.....	65
Figure IV-12: Courbe de rendement pour la journée type 22 décembre.....	66
Figure IV-13: Courbe de rendement pour la journée type de l'année 22 juillet.....	66
Figure IV-14: Courbe de rendement pour la journée type moyenne annuelle.....	67
Figure IV-15 : Organigramme de calcul du rendement global.....	69
Figure IV-16: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (22 juin).....	70
Figure IV-17: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (22 juin).....	70
Figure IV-18: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (21 décembre)...	71
Figure IV-19: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (21 décembre)...	71
Figure IV-20: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (21 mars).....	72
Figure IV-21: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (21 mars).....	72
Figure IV-22: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (23 septembre)...	73
Figure IV-23: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (23 septembre)...	73
Figure IV-24: Courbe de rendement pour la journée type du (23 septembre).....	74
Figure IV-25: Courbe de rendement pour la journée type du (21 mars).....	74
Figure IV-26: Courbe de rendement pour la journée type du (21 décembre).....	75
Figure IV-27: Courbe de rendement pour la journée type du (21 juin).....	75

Liste des tableaux:

Tableau I-1 Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.....	26
Tableau I-2 : Représentative du potentiel solaire en Algérie.....	27
Tableau IV-1- Caractéristiques du capteur étudié.....	56
Tableau IV-2 Du résultat de puissance après la simulation avec SAM	63
Tableau IV-3 Comparaison des rendements maximaux après la simulation avec SAM.	67

Introduction générale

INTRODUCTION GENERAL:

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter. La grande partie de cette énergie consommable provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et de développer les énergies renouvelables qui sont inépuisable et propres.

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et aussi la plus facilement exploitable. De part la diversité de son utilisation et l'intérêt qu'elle porte à travers le monde, cette forme d'énergie a connu un grand essor ces dernières années. Toutefois, le prix élevé de cette énergie par rapport au prix des énergies non renouvelables représente un handicap face à l'expansion de son utilisation.

L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde.

L'utilisation de l'énergie solaire la plus simple et la plus directe, est celle de la production d'eau chaude sanitaire. C'est aussi l'une des plus anciennes, comme plusieurs dispositifs de chauffe-eau-solaires ont été inventés depuis les débuts du XXème siècle jusqu'à nos jours, [26].

L'objectif de notre travail consiste en une étude de modélisation d'un capteur solaire plan muni d'un récepteur solaire à base de canettes de soda récupérées. Ceci, afin d'évaluer l'efficacité et la rentabilité d'un tel dispositif issu de produits récupérés, aidant ainsi à la prise de décision concernant la réalisation de ces capteurs solaires.

L'étude a été réalisée à l'aide de deux outils numérique, le logiciel (SAM), Solar Advistor Modal, et (MATLAB) comme outils de programmation a fin de modéliser le rendement thermique du capteur solaire plan.

Le présent travail inclut quatre chapitres : Le premier chapitre consiste à l'étude du gisement solaire avec une présentation de quelques notions et définitions astronomiques, souvent utilisées dans le domaine du solaire (modélisation de l'éclairement solaire).

Introduction générale

On s'est intéressés dans le deuxième chapitre aux systèmes solaires thermiques et plus précisément aux chauffe-eau solaires. Des généralités sur les chauffe-eau solaires, leurs différents composants ainsi que le principe de fonctionnement de ces derniers ont été présentés.

Dans le troisième chapitre, le comportement thermique du capteur plan en régime permanent a été étudié et présenté. Tandis que les résultats de la simulation réalisée à travers le logiciel (SAM) et la modélisation réalisée à travers l'outil (MATLAB) ont été présentées dans le quatrième et dernier chapitre, l'étude a été appliquée sur deux capteurs, le capteur étudié (muni de récepteur solaire à base de canettes de soda) et un capteur du commerce aidant ainsi à la comparaison de leurs performances thermiques.

A la fin, nous avons clôturé notre étude par une conclusion générale munie de quelques recommandations.

Chapitre I : Gisement solaire

I-1 Introduction :

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et renouvelable, elle est l'énergie la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, et est à l'origine de la quasi-totalité des sources énergétiques utilisées par l'homme, [2], de ce fait, et du fait qu'elle est abondante, elle peut aider à combler une bonne partie de nos besoins en énergie.

Parmi les applications de l'énergie solaire, on retrouve le solaire thermique, dans ce cas une bonne partie de l'énergie solaire est utilisée pour la production de la chaleur.

Longtemps étudié et encore de nos jours, le rayonnement solaire est essentiel à la survie de l'homme notamment grâce à la source de chaleur qu'il apporte. Cette énergie est renouvelable et inépuisable, elle dépend des conditions météorologique et géographique qui rend son exploitation difficile, pour ceci, l'homme a toujours cherché à développer des techniques et moyens pour l'estimer et simplifier l'exploitation de cette énergie.

Dans le présent chapitre nous avons donné un aperçu sur le gisement solaire et l'intérêt qu'a porté l'homme à son égard. Ceci, en donnant un historique sur l'utilisation de l'énergie solaire thermique, en passant par la modélisation détaillée de l'éclairement solaire global et enfin la présentation du gisement solaire en Algérie.

I-2 Historique et chronologie :

La production d'eau chaude sanitaire est parmi les applications directes de cette énergie renouvelable. Bien que, de nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer les performances énergétiques des installations solaires, [1]. L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité, par exemple, les Grecs allumaient la flamme olympique grâce à un système de miroirs concentrant les rayons du Soleil.

Au XVIIIe siècle, François Vilette, opticien au palais de Versailles, conçoit un miroir en bronze (appelé miroir ardent) d'un mètre de diamètre, grâce auquel il a fait des démonstrations de fusion d'objets.

En 1747, Georges-Louis de Buffon expérimente un miroir qui concentre la lumière du soleil en un seul point focal. Il arrive à faire fondre un morceau d'argent à une température très élevée (la température de fusion de l'argent est de 1 044 °C).

À la fin du XVIIIe siècle, grâce à une lentille à liquide qui concentre les rayons solaires, Antoine Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de 1 800 °C.

Chapitre I : Gisement solaire

Dans les années 1780, Horace-Bénédict de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme « hélio thermomètre » ; cet instrument utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi un capteur solaire thermique à basse température.

En Novembre 2015 une « Alliance internationale pour l'énergie solaire » ou (ISA) « International solar alliance » a été créée. Cette alliance a réuni les états disposant d'importantes ressources solaires afin de mieux coordonner le développement de leur exploitation (thermique et photovoltaïque) via des actions de formation.

Parmi, les recherches qui ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer les performances énergétiques des installations solaires, on cite aussi : (Buzas et al, 1998) ; (Mohsen et al, 2002) ;(Knudsen et al, 2004) ; (Essen et al 2004); (Mokhtari et autres, 2006).

I-3 Gisement Solaire :

Le soleil :

Le Soleil est une étoile, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré. Il faudrait donc 93 000 soleils côte à côte pour occuper l'étendue de la voûte céleste. Son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète.

Le Soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales [3] :

- a. **L'intérieur:** où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux Investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint plusieurs millions et la pression un milliard d'atmosphère.
- b. **La photosphère:** l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.
- c. **Chromosphère et couronne solaire:** où la matière est très diluée, fait qui explique bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés), le rayonnement émis est très faible.

I-4 Géométrie Terre-Soleil :

I-4-1 Les coordonnées horaires :

I-4-1-1 La variation de la déclinaison du soleil :

La déclinaison δ : c'est l'angle 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 [5]. Elle s'obtient à partir de la formule suivante:

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin [0.980^{\circ} \times (\text{jour} + 284)] \text{ [Degré]} \text{ (I.1)}$$

Pour « jour », c'est un jour de l'année à partir des données que l'on rentre en entrée de la fonction : le jour et le mois. On introduit une condition nous permettant de prendre en compte le mois de février [4].

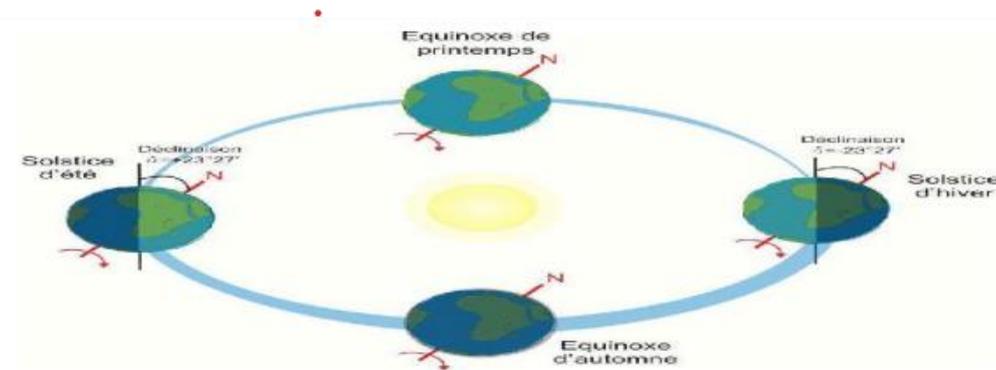


Figure I-1 : Variation de la déclinaison du soleil au cours du mouvement de la terre autour de soleil [5].

I-4-1-2 Angle horaire:

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV [5]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante:

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \text{ (I.2)}$$

Avec :

t : Est le temps.

Pour calculer l'angle horaire, Capderou, [6], a utilisé la formule suivante dans l'Atlas Solaire de l'Algérie:

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \text{ (I.3)}$$

Avec:

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

$\omega > 0$, avant midi TSV.

$\omega < 0$, après midi TSV.

I-4-2 Les coordonnées horizontales:

I-4-2-1 Hauteur du soleil :

La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $h = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil. La hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue qui avait été également adoptée par Capderou, [6].

$$\sin (h) = \cos (\phi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\phi) \times \sin (\delta) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

h : la hauteur du soleil ;

δ : La déclinaison ;

ω : L'angle horaire ;

ϕ : Latitude d'un lieu

I-4-2-2 Azimut du soleil :

L'azimut solaire (a) est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation [7] c'est-à-dire la projection de la droite reliant la terre au soleil. Il est compris entre $-180 \leq a \leq 180^\circ$, tel qu'il est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'azimut géographique, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation [5].

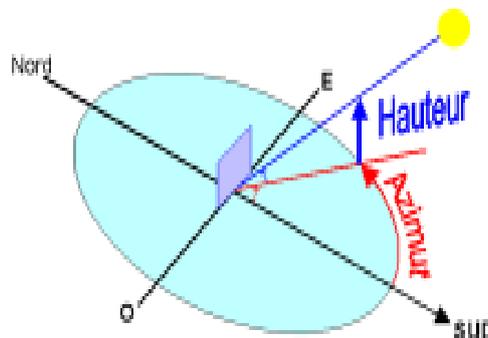


Figure I-2 : Schéma descriptive pour les angles azimut et hauteur solaire

L'équation de passage des coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante [4] :

$$\sin (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \sin (\omega) \quad (\text{I.5})$$

$$\cos (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \cos (\omega) \times \sin (\phi) - \cos (\phi) \times \sin (\delta) \quad (\text{I.6})$$

$$\sin (h) = \cos (\phi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\phi) \times \sin (\delta) \quad (\text{I.7})$$

I-4-3 Les coordonnées géographiques:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre constitué par deux angles :

I-4-3-1 La latitude :

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur la terre, au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence, elle varie entre la valeur 0° à l'équateur et 90° aux pôles, [8].

I-4-3-2 La longitude :

La longitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression du positionnement est-ouest d'un point sur la terre. La longitude de référence sur la terre est le méridien de Greenwich, elle vaut 360° par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de -180° (180°) Ouest à $+180^\circ$ (-180°) Est, [7].

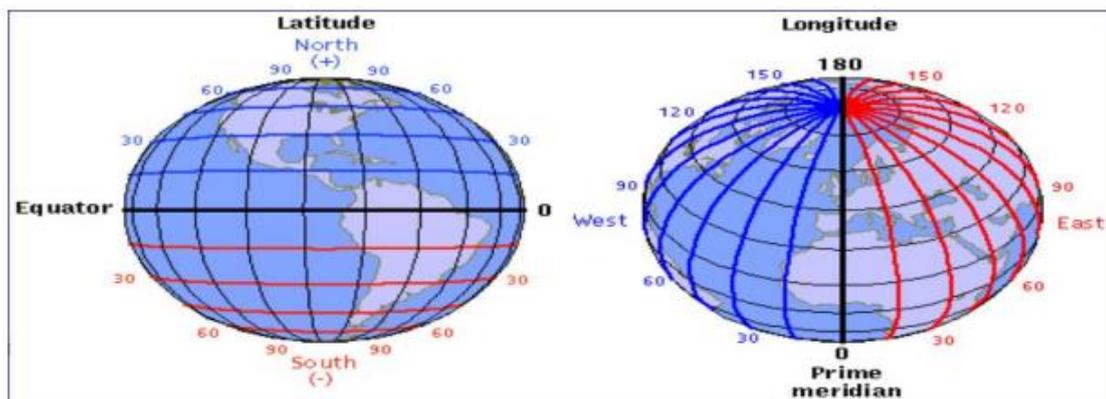


Figure I-3: Schéma descriptive pour les angles latitude et longitude de la terre [9]

I-5 La constante solaire :

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

Chapitre I : Gisement solaire

valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1367 [W.m²], par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), [7]. Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1.6\%$ de la distance Terre Soleil et donc une variation de ce flux. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire, [4]:

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad (I.8)$$

Où:

I_0 : Constante solaire, égale à 1367w/m²

m : Numéro du mois dans l'année, n : numéro du jour dans le mois..

I-6 Les temps solaires [4] :

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

$$TSV = TL - DEL + ET + \Lambda / 15 \text{ [heure]} \quad (I.9)$$

Avec

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

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

$$TL = TU + DEL \quad (I.10)$$

TU : Temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) ;

DEL : Correction due au changement d'heure légale (en Algérie $DEL = 1$) ;

ET : Equation du temps, ce terme corrige le temps solaire de plus ou moins 15 minutes et pourra donc être négligée en première approximation, sa relation est donnée par la formule qui suit :

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (I.11)$$

$$N' = (n - 81) \times 360/365 \quad (I.12)$$

N' : Facteur en fonction du numéro du jour 'n'

Chapitre I : Gisement solaire

Où :

On donne aussi une autre forme de cette équation mais en fonction de TSV et TSM, elle s'écrit sous la forme :

$$ET = TSV - TSM \quad (I.13)$$

Avec :

TSM : Temps solaire moyen

I-7 La déclinaison solaire :

La déclinaison solaire, notée “ δ ”, est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours [1].

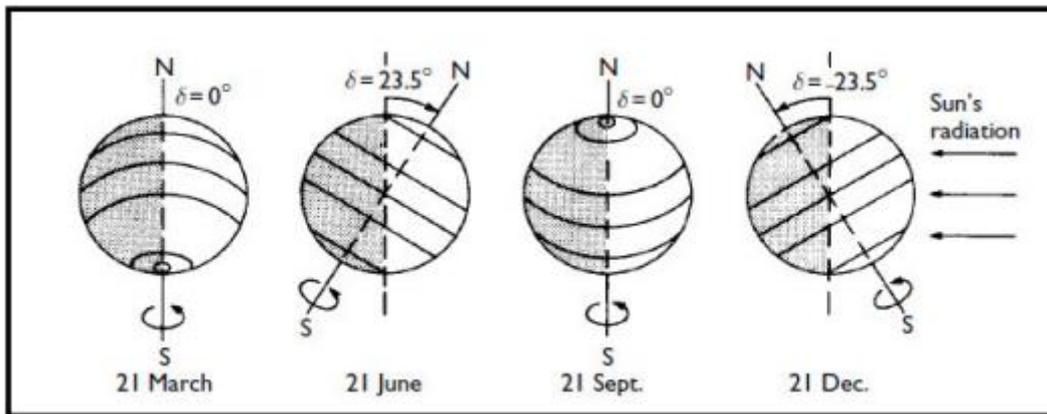


Figure I-4 : Trajectoire – écliptique – déclinaison

Avec :

- Équinoxe de printemps : 21 Mars $\delta = 0$
- Solstice d'été : 21 Juin $\delta = +23^{\circ}27'$
- Équinoxe d'automne : 21 Septembre $\delta = 0$
- Solstice d'hiver : 21 Décembre $\delta = -23^{\circ}27'$

Entre ces 4 points remarquables, δ prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation, (I.14) :

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin[0.980(n + 284)] \quad (I.14)$$

I-8 Structure et composition de l'atmosphère :

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, on cite:

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.

Chapitre I : Gisement solaire

- L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- Dioxyde de carbone, CO₂ (0,03%) ;
- Vapeur d'eau, H₂O: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtient en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère ;
- Ozone, O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude ;
- Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...etc

On trouvera sur la figure I-5, la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon longueur d'onde, [10].

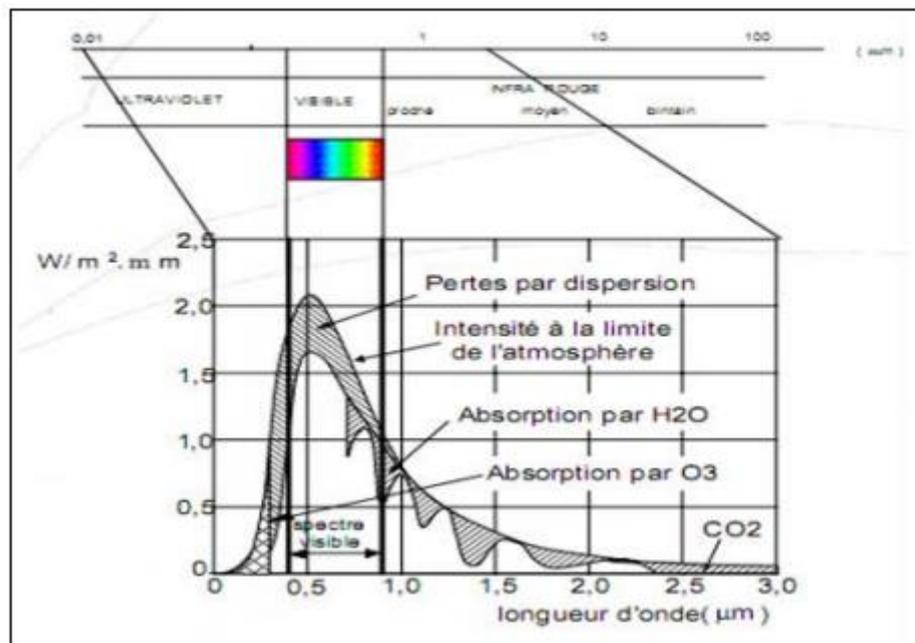


Figure I-5: Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol [10]

I-9 L'effet de l'atmosphère :

Avant d'atteindre le sol, l'énergie solaire émise par le soleil et reçue au sommet de l'atmosphère subit plusieurs transformations, ce qui est bien montré sur la figure qui suit :

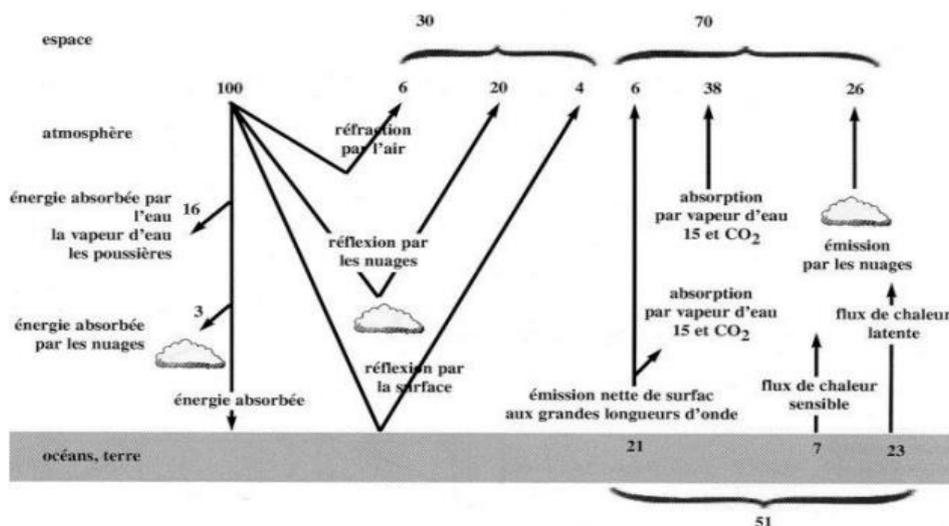


Figure I-6 : Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère [23]

I-9-1 Émissions solaire :

Sur le diagramme, tout est dimensionné par rapport à la valeur 100 qui correspond au rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère, soit environ 1360 W/m². Ce rayonnement est absorbé dans l'atmosphère et au sol, ou réfléchi vers l'espace.

L'énergie absorbée directement par l'atmosphère et correspondante au chauffage direct de l'atmosphère par l'énergie solaire se situe sur la partie gauche du diagramme. Elle correspond à environ 20 % de l'énergie solaire incidente au sommet de l'atmosphère. Ce chauffage direct de l'atmosphère par les rayons solaires n'est pas la première source de chaleur dans le système atmosphérique.

Car le chauffage de l'atmosphère est essentiellement un chauffage indirect.

50% de l'énergie solaire est absorbée au sol (l'atmosphère est essentiellement transparente pour le rayonnement solaire).

Une certaine partie du rayonnement est perdue pour le système climatique, elle est réfléchie directement vers l'espace selon trois processus essentiels :

Un processus de réflexion par l'air c'est la diffusion moléculaire, responsable du bleu du ciel. On estime ce phénomène à 6 % du rayonnement solaire incident. Cela constitue la seule contribution des gaz principaux (N₂, O₂, H₂O) à l'énergétique de la planète. 20 % de l'énergie solaire reçue est réfléchie par les nuages.

La réflexion par les surfaces : 4% de l'énergie incidente est réfléchie par les surfaces.

Chapitre I : Gisement solaire

Ces surfaces sont très différenciées, on trouve d'énormes oppositions entre des zones désertiques (albédo 30 %), des forêts où l'albédo est égal à 10 % ou des océans dont les surfaces réfléchissent jusqu'à 80 % [3]-[23].

I-9-2 Émissions terrestres :

Sur la partie droite de la Figure I-6, on voit la manière dont ce chauffage est équilibré par les émissions terrestres.

La principale composante est l'émission de rayons infrarouges vers l'espace. Seule une toute petite partie de cette émission se fait directement vers l'espace (6 % sur le diagramme).

La plus grande partie du rayonnement infrarouge est en fait absorbée dans l'atmosphère par des gaz à effet de serre (molécules suffisamment compliquées pour être excitées et ayant au moins trois atomes, H₂O, CO₂, CH₄ ou plus...). Ces molécules absorbent le rayonnement issu de la Terre et elles le réémettent en deux parties : une partie vers le sol et une partie vers l'espace, plus petite, que celle que l'on obtiendrait par une émission directe du sol.

C'est ce que l'on appelle « L'EFFET DE SERRE ».

I-9-3 Deux autres termes existent :

- Le flux de chaleur sensible qui est un flux de conduction thermique entre le sol et l'atmosphère. L'air se réchauffe près du sol et il monte dans l'atmosphère.
- Le flux de chaleur latente qui correspond à un processus plus compliqué de refroidissement au niveau des océans ou de la végétation continentale par évaporation de l'eau : cette chaleur est regagnée par l'atmosphère lors de la condensation de l'eau dans les nuages. Ce terme (23 %) est en fait le premier terme de chauffage direct de l'atmosphère.

L'atmosphère est donc chauffée en priorité par condensation de l'eau dans les nuages [3]-[23].

I-10 Le rayonnement solaire au sol :

L'éclairement solaire incident sur la terre peut être distingué sous forme de 3 flux : global, direct, diffus,

- **Le rayonnement solaire global :** Est le rayonnement émis par le soleil et incident sur une surface donnée, il est composé de l'éclairement direct et de l'éclairement diffus.
- **Le rayonnement direct :** Est le rayonnement solaire incident directement sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.
- **Le rayonnement diffus :** Est une composante du rayonnement solaire global. A l'exception du rayonnement direct, il comprend la plus grande partie du rayonnement

Chapitre I : Gisement solaire

diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice, [10].

Les ondes arrivant sur terre couvrent un domaine spectrale allant du rayonn X (ultraviolet=200-400nm) aux infrarouges de basses longueurs d'onde (800- 2400nm).

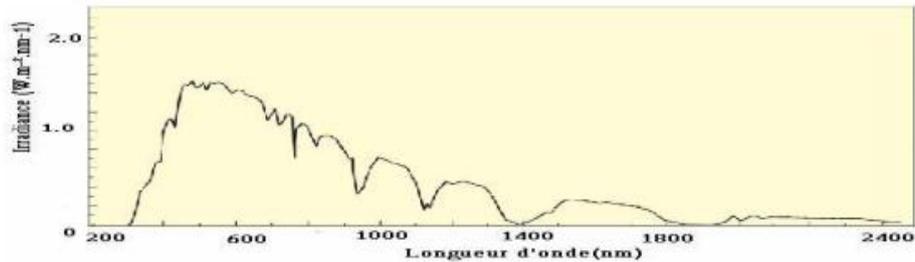


Figure I-7 : Variation de l'irradiation arrivant sur terre en fonction de sa longueur d'onde.

I-11 Modélisation de l'éclairement solaire :

I-11-1 Modèle de Perrin de Brichambaut :

Pour l'éclairement solaire, Perrin de Brichambaut propose [24]:

$$I_b = A \sin h \exp \left\{ - \left[C \sin \left(h + 4 \frac{\pi}{180} \right) \right]^{-1} \right\} \quad (\text{I.15})$$

$$I_d = B (\sin h)^{0.4} \quad (\text{I.16})$$

Le global est estimé par sommation ou directement par :

$$I_g = D (\sin h)^E \quad (\text{I.17})$$

I_b : Irradiation directe

I_d : Irradiation diffuse

I_g : Irradiation globale

Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel (voir tableau I-1).

Tableau I-1 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.

Ciel	A W/m ²	B W/m ²	C	D W/m ²	E
Très pur	1300	87	6	1150	1.15
Moyen	1230	125	4	1080	1.22
Pollué	1200	187	2.5	990	1.25

D'après Capderou [25], la relation donnant le meilleur résultat pour l'Algérie s'écrit :

Chapitre I : Gisement solaire

$$I_g = 1080 \left[1 + 0.033 \cos\left(360 \frac{N}{365}\right) \right] \sin h \left[\frac{\sin h}{(0.89)^Z} \right]^{0.22} \quad (I.18)$$

Z : étant l'altitude du lieu, exprimée en km.

I-12 Potentiel solaire en Algérie [11] :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2650 kWh/m²/an au Sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh.

Tableau I-2 : représentative du potentiel solaire en Algérie.

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

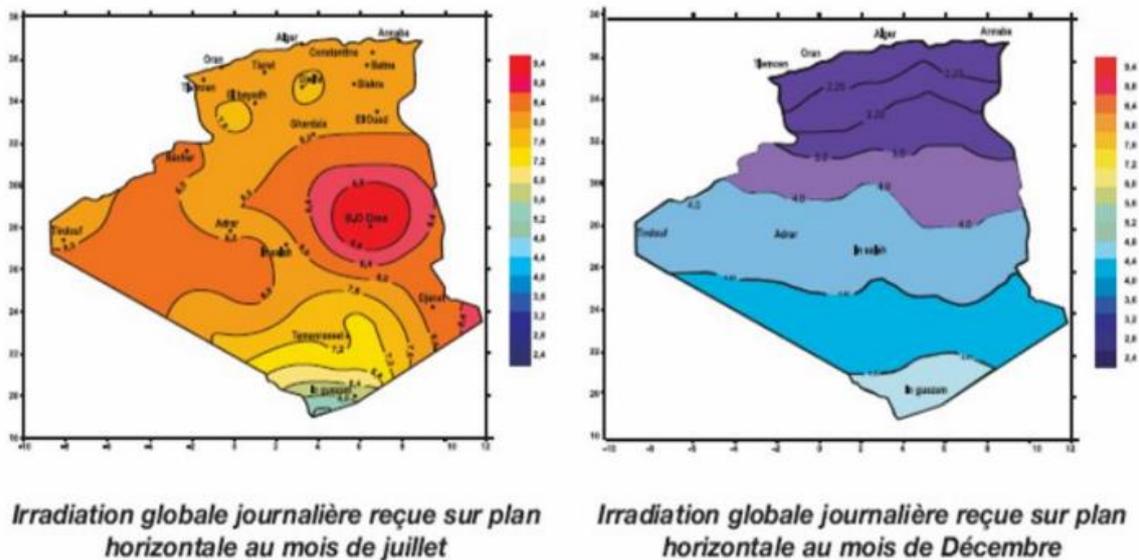


Figure I-8: Atlas solaire Algérien[27]

Chapitre I : Gisement solaire

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien . Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

I-13 Conclusion :

Dans le présent chapitre nous avons donné un bref aperçu sur le gisement solaire, sa modélisation ainsi , qu'un historique sur l'utilisation de l'énergie solaire thermique. Les définitions et détails sur les dispositifs permettant le chauffage de l'eau sanitaire à basse température (chauffe eau-solaires) sont donnés dans le chapitre suivant.

Chapitre II :Généralités sur les chauffe-eau solaires

II-1 Introduction:

Le principe d'un chauffe-eau solaire repose sur la captation de l'énergie issue des rayons du soleil et l'exploitation de cette énergie pour produire de l'eau chaude sanitaire. Ainsi, les chauffe-eau solaires sont considérés comme une solution d'avenir. Aujourd'hui pour que l'eau chaude sanitaire apporte une réelle satisfaction et un certain niveau de confort, elle doit répondre à plusieurs critères :

- Disponibilité en permanence ; en qualité suffisante ; à la température désirée, et avec le moindre coût (coût abordable).

Le présent chapitre contient des généralités sur les chauffe-eau solaires, les différents types et les principaux composants de ces derniers.

II-2 Définition de chauffe-eau solaire :

Les systèmes solaires d'eau chaude sanitaire, les capteurs plans solaires, ou encore les chauffe-eau solaires sont des systèmes thermiques actifs qui utilisent l'énergie du soleil, via un capteur solaire pour couvrir une partie des besoins en eau chaude sanitaire.

En d'autres termes, un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS).

Un système de chauffage solaire d'eau sanitaire est un système équipé d'un ou de plusieurs panneaux solaires produisant de l'eau chaude pour les besoins en eau chaude sanitaire. On utilise la dénomination de CESI (Chauffe -eau Solaire Individuel) qui est équipé simplement de panneaux solaires et d'un réseau de circulation avec pompe faisant circuler l'eau chaude dans un ballon solaire. Un appoint d'énergie est nécessaire pour compenser les besoins hors couverture solaire. Cet appoint peut être apporté par une simple résistance électrique, ou par une chaudière ou une pompe à chaleur.

II-3 Les composants d'un chauffe-eau solaire :

Les chauffe-eau solaires sont constitués essentiellement de trois composants:

- Un capteur solaire plan ;
- Une cuve de stockage d'eau chaude ;
- Un circuit hydraulique qui peut être une simple canalisation dans le cas d'un système à thermosiphon ou bien doté d'une pompe de circulation dans le cas d'un système actif.

II-3-1 Le Capteur solaire plan :

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et le corps noir.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [12].

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur à la périphérie du capteur [12].

II-3-1-1.Éléments de construction

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

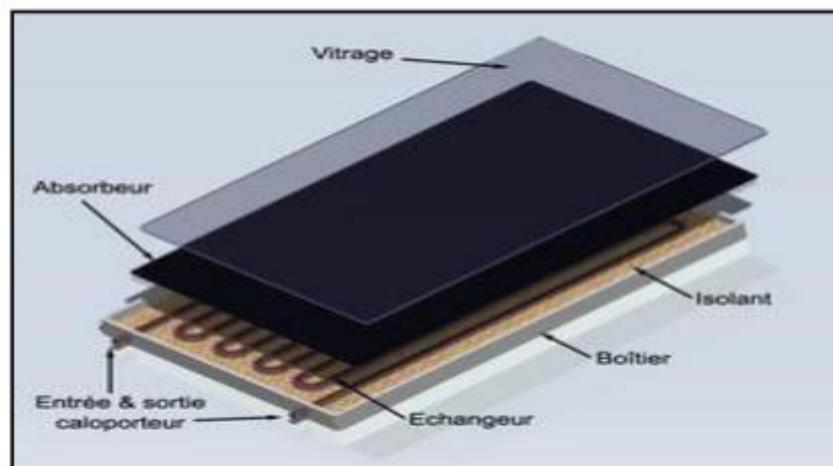


Figure II-1: Composants d'un capteur solaire plan vitré

a. Le boîtier:

Le boîtier constitue l'enveloppe arrière et latérale de l'appareil, il est constitué de matériaux choisis, tels que les métaux en feuille ou profilé, matériaux en plastique armé et même le contre plaqué. Les métaux les plus utilisés sont l'acier galvanisé ou galvanisé pré-laqué et les alliages d'aluminium, [12]. On peut rencontrer deux types de structures de boîtier :

- **Le boîtier simple:** Il est constitué d'une seule épaisseur de matériau en forme de bac dans lequel sont montés l'isolation et l'absorbeur ;
- **Le boîtier double:** Il possède une structure en caisson qui lui confère une plus grande rigidité et permet une meilleure intégration de l'isolation.

Chapitre II : Généralités de chauffe-eau solaire

b. La couverture transparente :

C'est la partie à travers laquelle le rayonnement atteint la surface de l'absorbeur. L'une de ses caractéristiques est de réaliser l'effet de serre. Les matériaux les plus utilisés sont :

- Le verre.
- Les polycarbonates (Lexan, Makrolon).
- Les polymétacrylates de méthyle (Plexiglas, Altuglas).

En ce qui concerne les verres, sont préférés ceux dont le taux d'oxyde de fer est le plus faible (verre horticole par exemple).

On rencontre également des couvertures transparentes multiples (doubles) et des couvertures constituées par un film souples transparent tel que le Mylar ou le Tedlar, parmi les fonctions de la couverture transparente on peut citer : la protection de l'absorbeur et l'isolation thermique. Car elle réfléchit le rayonnement au minimum et absorbe la lumière aussi peu possible de sorte que la totalité du rayonnement atteint la surface de l'absorbeur, [12].

c. L'absorbeur:

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur. [12]

Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux [12].

- Les avantages de l'utilisation du plastique comme matériau de construction de l'absorbeur, sont :

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

- Les inconvénients sont :

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

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

Chapitre II : Généralités de chauffe-eau solaire

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 52 mm d'épaisseur avec des variantes de 150 à 300 mm [13].

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [13].

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact [13].

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi qu'une faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R.. Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir [13].

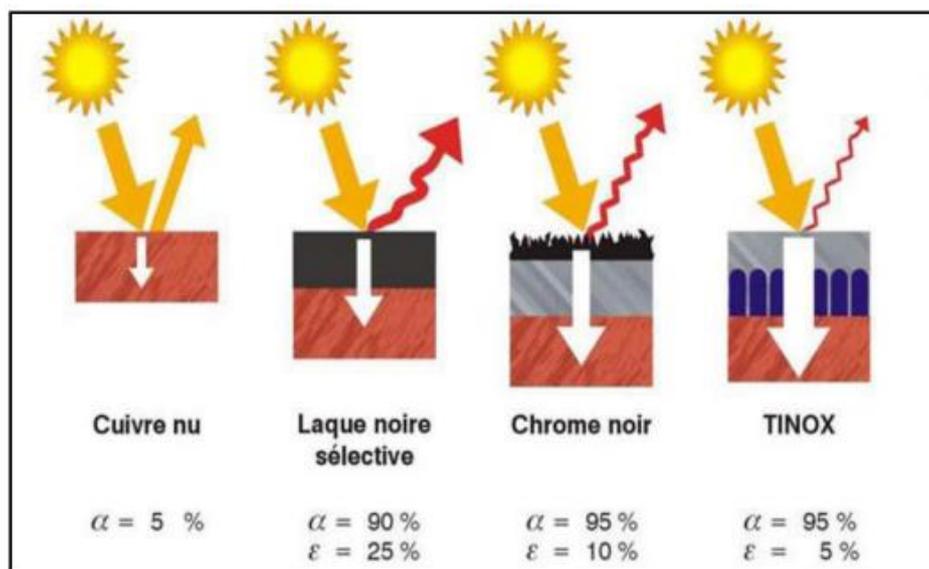


Figure II-2: Absorptivité et émissivité de divers types de revêtements [22]

a. Formes possibles des absorbeurs :

On distingue différentes formes d'absorbeur Figure (II-3) dont :

- Les absorbeurs à plaques ou ailettes de cuivre et tuyauteries de cuivre soudées (les plus courants) ;
- Les absorbeurs à plaques ou ailettes de cuivre et tuyauteries enchâssées ;
- Les absorbeurs à plaques ou ailettes d'aluminium et tuyauteries de cuivre enchâssées (type Sunstrip) ;
- Les absorbeurs à plaques d'aluminium profilées soudées ;
- Les absorbeurs à plaques d'acier inoxydable profilées soudées (type Énergie Solaire SA).

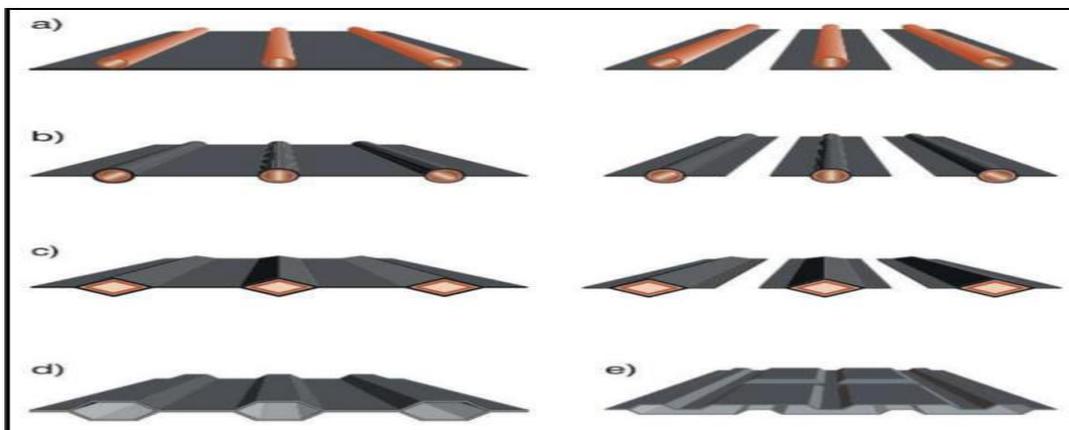


Figure II-3: Diverses formes d'absorbeurs [22]

b. Le fluide caloporteur:

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

c. L'isolation thermique:

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

Chapitre II : Généralités de chauffe-eau solaire

– **Partie avant de l'absorbeur:**

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm [5].

En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [12].

– **Parties arrière et latérale:**

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer à hautes températures. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque de l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [12], [13].

II-3-2 La cuve de stockage :

La cuve de stockage est un élément essentiel dans l'installation de chauffage d'eau solaire. Comme son nom l'indique, elle permet de stocker l'eau chaude venant des capteurs pour la restituer au moment des besoins d'utilisation, elle peut contenir ou non un échangeur de chaleur. Voir Figure (II-4).

Comme pour le capteur, la cuve de stockage est aussi isolée, afin, d'éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur. La cuve de stockage doit être bien isolée en choisissant une épaisseur de l'isolant thermique adéquate et économique.

D'une manière générale, le stockage est caractérisé par, [13]:

- Le mode d'accumulation de chaleur (sensible ou latente) ;
- La capacité thermique du stock ;
- Les pertes thermiques du stockage.

Suivant la capacité de stockage on distingue deux types :

- Le stockage long durée (inter- saisonnier).
- Le stockage court durée (ne dépassant pas quelques journées ou quelques heures).

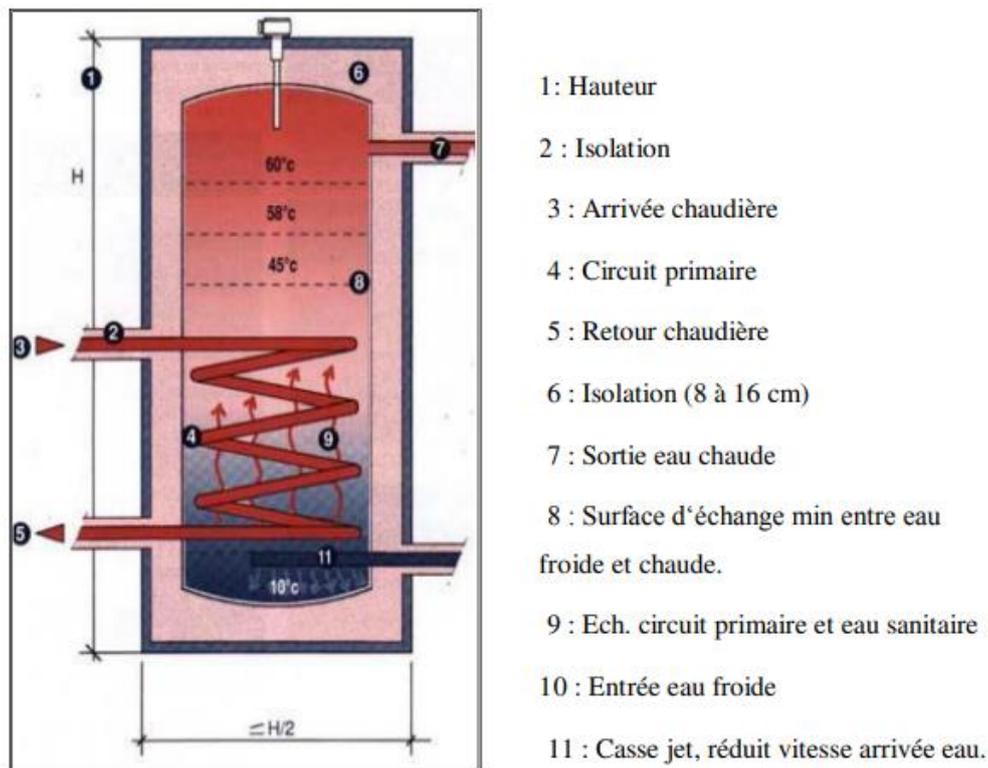


Figure II-4: La cuve de stockage avec échangeur

II-4 Le principe de fonctionnement d'une installation solaire à chauffe-eau solaire

Une installation à chauffe-eau solaires, voir le schéma de la figure (II -5), permet de:

- **Transporter la chaleur**

C'est le rôle du circuit primaire, qui est étanche et calorifugé (matériau qui réduit les déperditions de chaleur, nécessaire pour isoler canalisations de chauffage, d'eau chaude sanitaire et dans le circuit primaire du chauffe-eau solaire en particulier dans les locaux non chauffés), il contient de l'eau additionnée d'antigel. Ce liquide s'échauffe en passant dans les tubes du capteur, et se dirige ensuite vers un ballon de stockage d'eau.

- **Restituer la chaleur**

Ceci, grâce à un échangeur thermique, il cède ses calories (la chaleur) solaires à l'eau sanitaire. Le liquide primaire, refroidi, repart vers le capteur, ou il est chauffé à nouveau tant que l'ensoleillement reste efficace. Et ainsi de suite jusqu'au soir.

- **Stocker l'eau chaude**

Le ballon solaire est une cuve métallique bien isolée. Il constitue la réserve d'eau sanitaire de l'installation. L'eau chaude soutirée est remplacée immédiatement par la même quantité

Chapitre II : Généralités de chauffe-eau solaire

d'eau froide du réseau, qui est réchauffé à son tour par le mélange d'eau et d'antigel qui se trouve dans le circuit primaire.

– Faire circuler le liquide caloporteur

La circulation du liquide peut être naturelle ou forcée :

- Dans le premier cas, le liquide caloporteur circule grâce à sa différence de densité avec l'eau du ballon. Tant qu'il est plus chaud, donc moins dense qu'elle .Il s'élève naturellement par thermosiphon (circulation naturelle d'un liquide dans une installation du fait de la variation de sa masse volumique en fonction de la température).donc le ballon doit être placé plus haut que les capteurs .Sur ce principe sont conçus les chauffe eau-solaires 'en thermosiphon (système de pompage des fluides (gaz ou liquide) basé sur la dilatation et la poussée d'Archimède.
- Dans le second cas, une petite pompe électrique, le circulateur, met en mouvement le liquide caloporteur (fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de températures)quand il est plus chaud que l'eau sanitaire du ballon .Son fonctionnement est commandé par un dispositif de régulation, jouant sur les différences de températures : si la sonde du ballon est plus chaude que celle du capteur, la régulation coupe le circulateur Sinon ,le circulateur est remis en route et le liquide primaire réchauffe l'eau sanitaire du ballon .

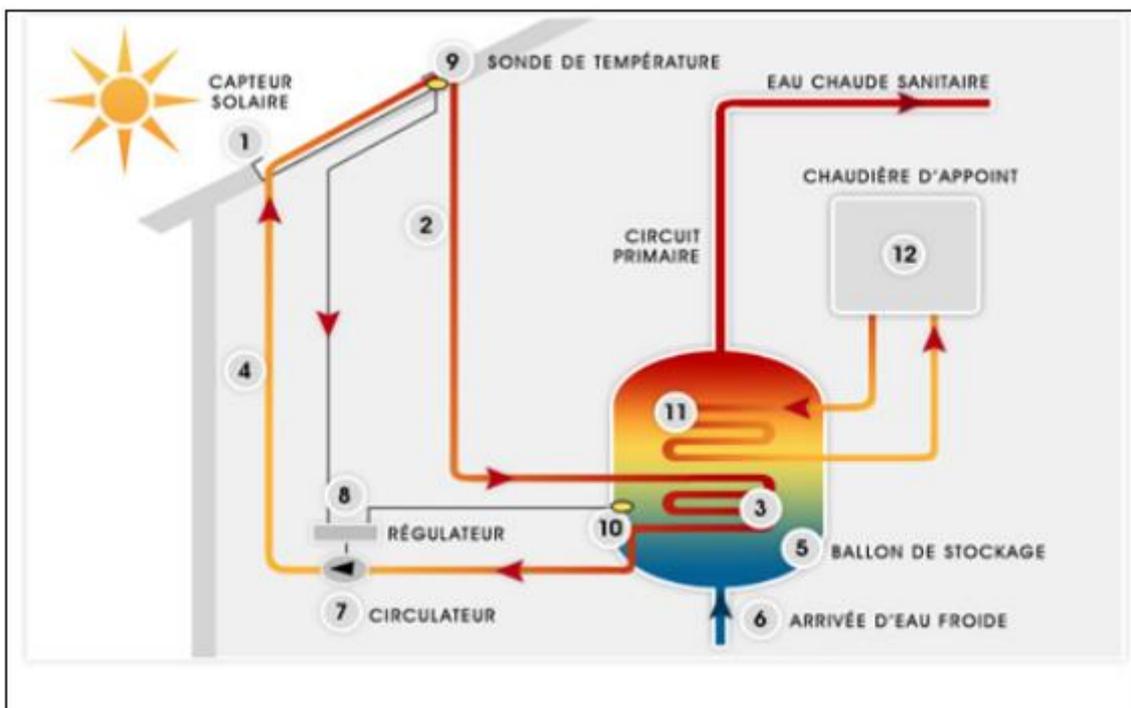


Figure II-5 : Schéma général du fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

II-5 Les types de chauffe-eau solaire

Selon la nature de circulation du fluide, on distingue six systèmes de CESI,

- a) Les chauffe-eau monoblocs.
- b) Les chauffe-eau à thermosiphon.
- c) Les Chauffe-eau stockeur.
- d) Les Chauffe eau solaire à éléments séparés
- e) Les chauffe-eau à circulation forcée.
- f) Les chauffe-eau à auto-vidange.

a. Le Chauffe-eau solaire monobloc [14]

Les Capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et placés à l'extérieur. Ils peuvent être installés en toiture, sur terrasse ou au sol et fonctionnent sans électricité.

Ce système est simple (thermosiphon) et peu coûteux. Mais le ballon se refroidit plus rapidement, même s'il est bien isolé. Il peut servir à préchauffer l'eau qui alimente un équipement classique existant.

Ce chauffe-eau est compact et bien adapté à la pose sur supports inclinés, en toiture terrasse. Il se prête moins bien à la fixation sur un toit en pente.



Figure II-6: Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact).

b. Le chauffe-eau solaire plan à “thermosiphon”

Comme expliqué précédemment, le terme “Thermosiphon”, veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce aux différences de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut

Chapitre II : Généralités de chauffe-eau solaire

que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermo circulation.

Ce type de chauffe-eau solaire est très simple les risques de pannes sont faibles. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes. [15].

Masse volumique de l'eau en fonction de sa température (kg).

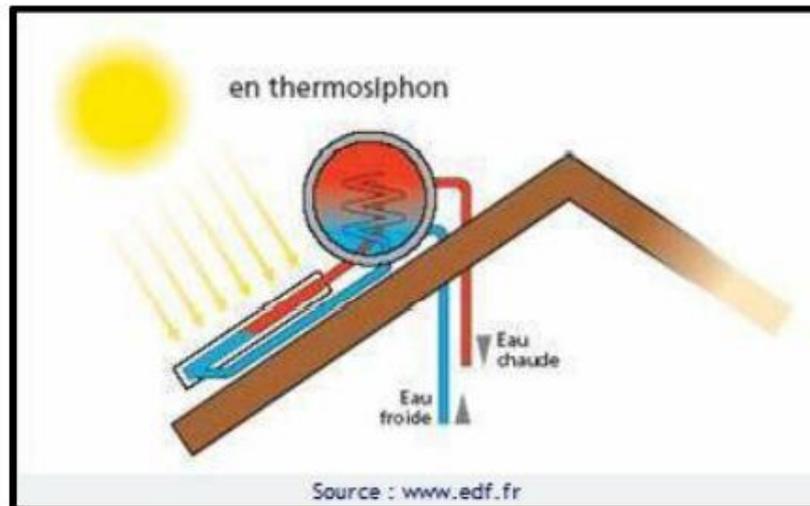


Figure II- 7: Le chauffe-eau à thermosiphon.

c. Le Chauffe-eau stockeur

Le principe du chauffe-eau stockeur (ou auto-stockeur) est très ancien. Il est constitué d'un réservoir disposé dans un coffre isolant et protégé par une couverture transparente.

Pendant la période d'ensoleillement, la température du ballon, recouvert d'un revêtement absorbant noir, s'élève.

Pour éviter que celle-ci ne diminue pendant la nuit, le revêtement est généralement du type « sélectif ». Avant que ces revêtements n'existent, il était courant de rencontrer des chauffe-eau munis d'un double vitrage ou d'un volet isolant qui était disposé sur le capteur, hors période d'ensoleillement.

Ce type de chauffe-eau est bien adapté aux régions où le risque de gel n'existe pas et où la température ambiante nocturne est très élevée. C'est, en particulier, le cas des régions tropicales.



Figure II-8 : Chauffe-eau stockeur.

d. Le Chauffe eau solaire à éléments séparés

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique.

leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation, ils sont connus pour leur souplesse d'utilisation.

Ce chauffe-eau est particulièrement bien adapté aux régions où il gèle en hiver.

Deux circuits distincts permettent l'utilisation d'un fluide antigel à l'extérieur.

Ces systèmes possèdent une régulation qui enclenche le calculateur dès que l'énergie solaire est disponible, ce qui permet des performances supérieures aux systèmes en thermosiphon.

Les périodes de faible ensoleillement sont compensées par un système de chauffage d'appoint (gaz, fioul ou électricité) comme pour le chauffe-eau monobloc.

Le dimensionnement de l'installation dépend en grande partie des besoins de l'utilisateur. Il est inutile de sur dimensionner la surface de capteurs si l'on utilise peu d'eau chaude, il y aura du gaspillage d'énergie pendant l'été.



Figure II-9 : Chauffe-eau solaire à éléments séparés.

e. Les chauffe-eau à circulation forcée [16]

Cette catégorie regroupe les chauffe eau-solaires qui font appel à un circulateur pour transférer l'eau chauffée dans le collecteur depuis le capteur solaire vers le ballon de stockage. Contrairement aux chauffe-eau fonctionnant par thermosiphon, la disposition relative du ballon et du capteur est totalement libre. Ce qui représente un des avantages d'un système de chauffe eau-solaire à circulation forcée.

Sous les climats froids, ces systèmes donnent de meilleures performances. Par contre, sous les climats chauds, les chauffe-eau solaire à circulation naturelle seront plutôt conseillés pour leur prix plus faible, leur cout de fonctionnement.

- **Avantages:**

- Réglage de débit du fluide caloporteur.
- Possibilité d'arrêter la circulation du fluide caloporteur dans le capteur.
- Possibilité d'utilisation de l'antigel (éviter le risque de gèle).
- Le capteur n'est pas soumis à des fortes pressions.

- **Inconvénients:**

- Moins d'énergie transmise à l'eau (pertes dans les échangeurs)
- Les arrêts involontaires des pompes
- Besoin d'une alimentation électrique

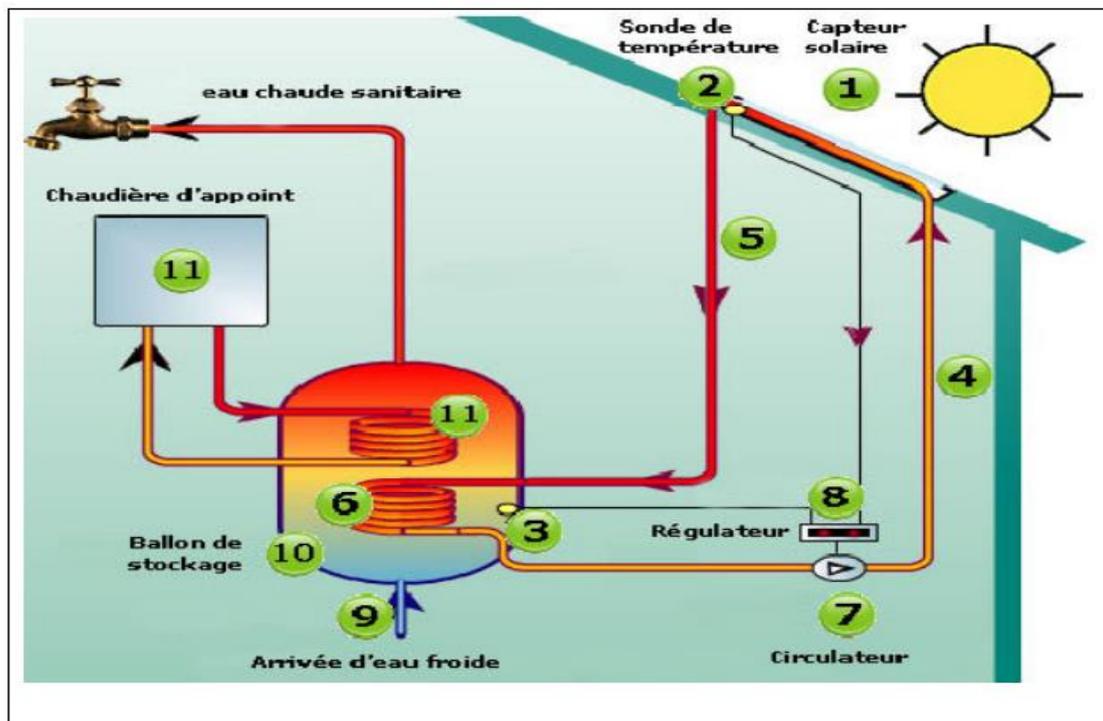


Figure II-10: Système à circulation forcée

f. Les chauffe-eau à auto vidange [17]

C'est une autre alternative pour éviter le risque de gel, elle consiste à vider les panneaux solaires en période de non utilisation. Dans ce cas, le ballon est toujours situé plus bas que les panneaux solaires. Dès que le soleil ne chauffe plus, la circulation entre les panneaux et le ballon s'arrête et le circuit se vidange automatiquement.

Dès que l'ensoleillement reprend, la circulation se remet en route. Dans ce cas on utilise directement l'eau sanitaire dans le circuit.

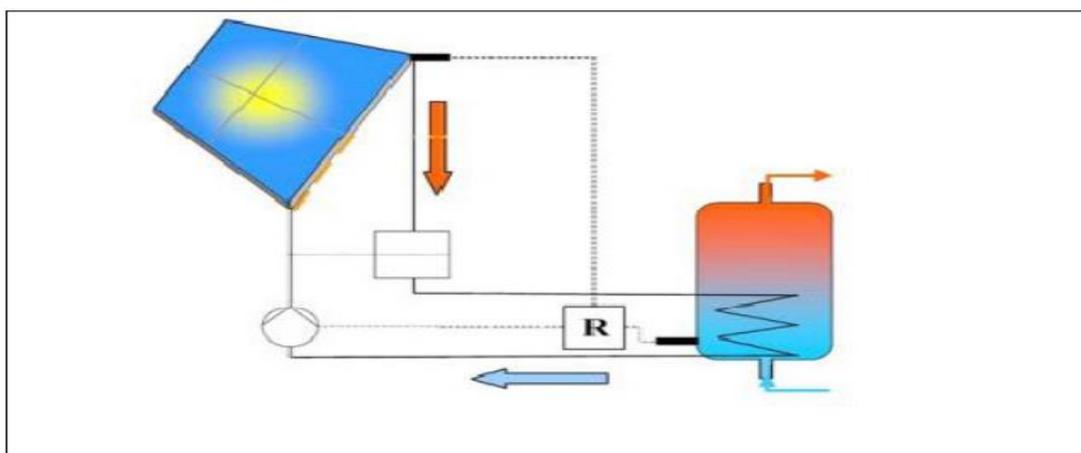


Figure II-11 : Les chauffe-eau à auto vidange.

II-6 Avantages et inconvénients d'un chauffe-eau solaire :

II-6-1 Les avantages d'un chauffe-eau solaire sont nombreux, en voici les principaux :

Il est écologique, ne consomme presque aucune énergie fossile et ne dégage aucun gaz à effet de serre ;

- Il utilise une énergie disponible, illimitée, renouvelable et gratuite : le soleil ;
- Il a une longue durée de vie : une vingtaine d'année environ, ce qui en fait un investissement fiable et durable ;
- Il produit l'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie solaire, renouvelable et illimitée ;
- Il permet de réaliser d'importantes économies d'énergie ;
- Il est écologique et n'a pas d'impact négatif sur l'environnement ;
- Il permet de revaloriser la maison, qui pourra être louée ou vendue plus cher ;
- Il demande peu d'entretien ;
- Il est éligible à des aides financières.

II-6-2 Les inconvénients sont entre autres :

- La nécessité d'un système d'appoint pour couvrir les besoins en ECS à l'absence, d'ensoleillement ou lorsque l'ensoleillement est faible ;
- Un coût assez élevé : le CES est le système au coût le plus élevé, comparé aux autres (électrique, à gaz,...). Cependant, il y'a un retour d'investissement après quelques années ;
- Il représente un investissement important au départ ;
- Il ne fonctionne pas la nuit, et est moins performant sous certaines conditions Météorologiques ;

II-7 Conclusion :

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux chauffe-eau-solaires, on a parlé des différents types de chauffe-eau-solaires, on a cité et défini leurs essentiels composants, et à la fin on a donné les principaux avantages et inconvénients de chauffe-eau solaire. Dans le chapitre qui suit une modélisation détaillée d'un capteur solaire plan du type (Thermosiphon indirect) est donnée.

Chapitre III: Modélisation thermique de chauffe-eau solaire (CES)

III-1 Introduction:

Afin d'arriver à simuler le comportement d'un capteur plan exposé aux rayonnements solaires à une position géographique et une période données de l'année nous devons en premier lieu établir les équations mathématiques et les bilans énergétique qui régissent les phénomènes thermiques dans le capteur solaire plan.

Dans ce chapitre, on s'intéresse particulièrement à la modélisation des performances thermiques d'un capteur plan, pour ceci nous avons établi un bilan énergétique au niveau du capteur, formuler des hypothèses pour simplifier nos calculs, déterminer les différents coefficients des transferts thermiques ainsi que le coefficient d'échange global.

III-2 : Modélisation d'un capteur solaire plan :

III-2-1- Hypothèses de la modélisation :

- 1- La surface du capteur est uniformément éclairée ;
- 2- Chacun des éléments du capteur soit à une température homogène ;
- 3- Regime permanent ;
- 4- La température de l'air environnant est homogène, par conséquent on considère que les pertes thermiques vers l'avant et l'arrière se font vers la même température ambiante ;
- 5- L'écoulement de la chaleur est unidimensionnel ;
- 6- La température de l'absorbeur est uniforme ;
- 7- La température du vitrage est uniforme ;
- 8- L'effet d'ombre est négligeable;
- 9- La température du ciel est uniforme ;

III-2-2- Bilan thermique et énergétique d'un capteur solaire plan :

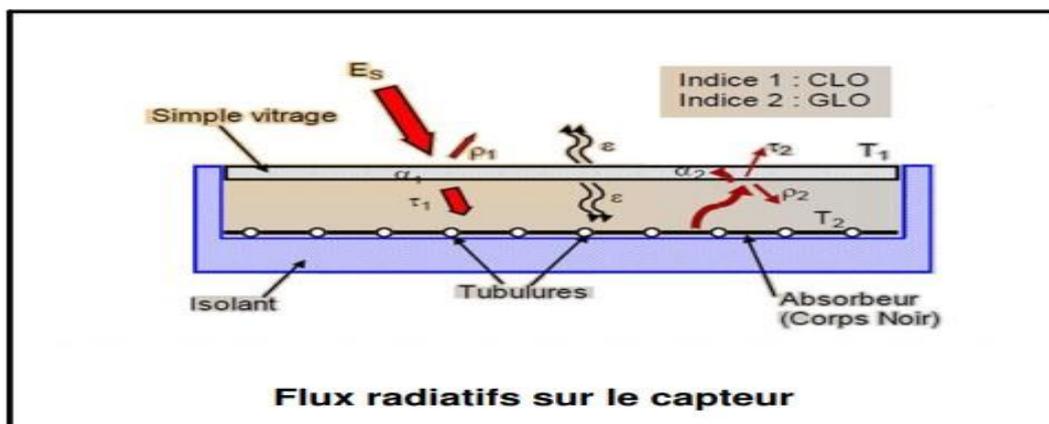


Figure. III-1: Schéma montrant les échanges thermique avec le milieu extérieur.

Chapitre III : Modélisation thermique de chauffe-eau solaire

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convention une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ($T_{fs}-T_{fe}$) à la traversée du capteur.

- **Puissance absorbée:**

Le bilan thermique de la paroi absorbante

nous permet l'estimation de la puissance absorbée Q_{sa} par la formule qui suit [18] :

$$Q_{sa} = Q_p + Q_u + Q_{st} \quad (\text{W}) \quad (\text{III-1})$$

Où :

Q_p : Puissance perdu par la paroi absorbante.

Q_u : Puissance utile transmis au fluide caloporteur.

Q_{st} : Puissance stocké dans le capteur qui s'écrit

$$Q_{st} = M_f \cdot C_f \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{W}) \quad (\text{III-2})$$

M_f : Masse en fluide du capteur définie par :

$$m_i \cdot C_i = M_f \cdot C_f \quad (\text{III-3})$$

i : Représentant les différents éléments constitutifs du capteur.

T : Température moyenne du capteur.

t : Temps.

La puissance absorbée peut aussi s'écrire, sous la forme suivante :

$$Q_{sa} \approx \tau_{cs} \cdot \alpha_{ps} \cdot G(i, \gamma)^* \cdot S \quad (\text{III-4})$$

Où :

$G(i, \gamma)^*$: Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ($\text{W} \cdot \text{m}^2$)

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

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

S : Surface de la paroi absorbante.

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

- **La puissance utile Q_u :**

$$Q_u = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (\text{W}) \quad (\text{III-5})$$

Où :

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

T_{fs} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

T_{fe} : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

- **La Puissance perdue Q_p :**

$$Q_p = h_p(T_{mp} - T_a) s \quad (\text{III-6})$$

Où :

h_p : Coefficient global de pertes du capteur

T_{mp} : Température moyenne de la paroi absorbante

T_a : Température de l'air extérieur

La puissance perdue peut être évaluée en fonction des puissances perdue, son équation et donnée par la forme [III-10].

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{mp} peut en première approximation être calculée par :

- **La température moyenne T_{mp} :**

$$T_{mp} = \frac{3T_{fs} + T_{fe} + \Delta T}{4} \quad (\text{III-7})$$

III-3 Rendements d'un capteur solaire [20] :

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

- i : est l'inclinaison du capteur par rapport au sol (horizontal)

- γ : est l'orientation du capteur dans le sens est-ouest

- **Le rendement global :**

$$\eta = \eta_0 - \frac{K(T_p - T_a)}{G} \quad (\text{III-8})$$

- **Le rendement interne :**

$$\eta_i = \frac{Q_u}{Q_{s \rightarrow p}} \quad (\text{III-9})$$

- **Le rendement optique:**

$$\eta_0 = \frac{Q_{s \rightarrow p}}{G^*(i, \lambda)} \quad (\text{III-10})$$

III-4- évaluation des pertes thermiques au niveau des différents constituants :

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert peuvent être schématisés comme indiqué sur la figure (III-2):

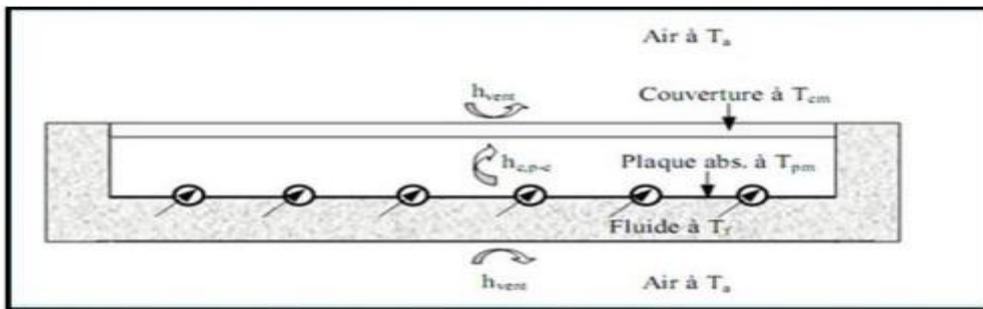


Figure III-2: Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert.

III-4-1 Pertes thermiques [20] :

Les pertes thermiques de l'absorbeur peuvent être évaluées par la formule qui suit :

$$Q_p = Q_{c,p-c} + Q_{r,p-c} = Q_{c,c-a} + Q_{r,c-a} - Q_{s \rightarrow c} \quad (\text{III-11})$$

Où :

$Q_{c,p-c}$: Flux échangé par convection entre la paroi absorbante et la couverture en verre ;

$Q_{r,p-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture en verre ;

$Q_{c,c-a}$: Flux échangé par convection entre la couverture en verre et l'air extérieur.

$Q_{r,c-a}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture en verre et le milieu extérieur.

$Q_{s \rightarrow c}$: Flux solaire absorbé par la couverture en verre transparente.

Chapitre III : Modélisation thermique de chauffe-eau solaire

Chacun de ces flux peut s'exprimer de la manière suivante :

- **Le Flux échangé par convection entre la paroi absorbante et la couverture :**

$$Q_{c,p-c} = h_{c,p-c}(T_p - T_c)S \quad (\text{III-12})$$

$h_{c,p-c}$: C'est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air.

$\phi_{r,p-c}$ Peut être calculé en considérant la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles infinies (la distance les séparant est faible devant leur largeur et leur longueur) grises et opaques (hypothèse de la couverture opaque au rayonnement IR), ces hypothèses permettent d'écrire :

- **Le Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture :**

$$Q_{r,p-c} = \sigma \frac{T_p^4 - T_c^4}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} S \quad (\text{III-13})$$

Que l'on peut aussi écrire :

$$Q_{r,p-c} = h_{r,p-c}(T_p - T_c) \quad (\text{III-14})$$

- **Le Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur :**

$$Q_{c,c-a} = h_{c,c-a}(T_c - T_a)S \quad (\text{III-15})$$

- **Le Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur :**

$$Q_{r,c-a} = \sigma \alpha_{ci}(T_c^4 - \varepsilon_a T_A^4)S = \sigma \alpha_{ci}(T_c^4 - T_{ciei}^4) \quad (\text{III-16})$$

$$Q_{r,c-a} = h_{r,c-a}(T_c - T_a)S \quad (\text{III-17})$$

- **Le Flux solaire absorbé par la couverture transparente :**

$$Q_{s \rightarrow c} = \alpha_{cs} G^*(i, \gamma) \quad (\text{III-18})$$

- **Le flux perdu par la plaque absorbante peut alors s'écrire :**

$$Q_p = (h_{c,p-c} + h_{r,p-c})(T_p - T_c)S = (h_{c,c-a} + h_{r,c-a})(T_c - T_a)S - \alpha_{cs} G^*(i, \gamma)S \quad (\text{III-19})$$

Chapitre III : Modélisation thermique de chauffe-eau solaire

Dans le cas où $\alpha_{cs} \approx 0$ (cas du verre), on obtient l'expression simplifiée suivante:

$$Q_p = \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{c,c-a} + h_{r,c-a}}} S \quad (\text{III-20})$$

- **Bilan thermique aux nœuds [19]:**

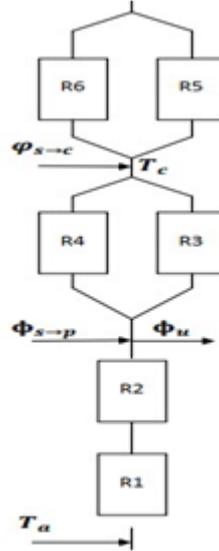


Figure III-3 : Schéma électrique équivalent des transferts thermiques.

R5,R6 : Résistance thermique entre le milieu ambiant et la vitre ;

R4,R3 : Résistance thermique entre la vitre et l'absorbeur ;

R2 : Résistance thermique entre l'absorbeur et l'isolant ;

R1 : Résistance thermique entre l'isolant et le milieu ambiant.

- **Le bilan thermique aux nœuds s'écrit [19]:**
- Dans ce qui suit un bilan thermique aux nœuds est représenté :

$$Q_{s \rightarrow c} + \frac{T_p - T_c}{R_8} = \frac{T_c - T_a}{R_9} \quad (\text{III-21})$$

$$Q_{s \rightarrow p} = \frac{T_p - T_c}{R_8} + \frac{T_p - T_a}{R_7} + \frac{\phi_u}{S} \quad (\text{III-22})$$

$$R_1 = R_6 = \frac{1}{h_{vent}} \quad (\text{III-23})$$

Avec :

$$h_{vent} = 5,7 + 3,8U_{vent} \quad (\text{III-24})$$

h_{vent} : La vitesse du vent.

$$R_2 = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (\text{III-25})$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{r,p-c}} \quad (\text{III-26})$$

Avec :

$$h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_p^4 + T_c^4)(T_p - T_c)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}}} \quad (\text{III-27})$$

α_{pi} : Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR.

α_{ci} : Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR.

$$R_4 = \frac{1}{h_{c,p-c}} \quad (\text{III-28})$$

$h_{c,p-c}$ est calculé par la corrélation suivante:

$$Nu = 1 + 1.44 \left(1 - \frac{1708(1.8 \sin \beta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos(\beta)}\right) \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)}\right) + \left(\frac{Ra \cdot \cos(\beta)}{5830}\right)^{0.666} + 1 \quad (\text{III-29})$$

$$h_{c,p-c} = Nu \frac{\lambda_{air}}{b} \quad (\text{III-30})$$

- β : L'angle d'inclinaison du capteur plan ;
- b : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante (m) ;
- λ_{air} : Conductivité thermique de l'air (W/m .K).

$$R_5 = \frac{1}{h_{r,c-a}} \quad (\text{III-31})$$

Avec

$$h_{r,c-a} = \alpha \alpha_{ci} \frac{T_c^4 - \varepsilon_a T_a^4}{T_c - T_a} \quad (\text{III-32})$$

U_{vent} : vitesse du vent ($m.s^{-1}$)

e_i : Épaisseur du fond du capteur (m)

λ_i : Conductivité thermique du fond du capteur ($w.m^{-1}.k^{-1}$)

- Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-a}}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (\text{III-33})$$

III-5 Détermination du profil de température de la paroi absorbante :

III-5-1 Profil de température dans la direction OY :

Nous allons dans un premier temps déterminer le profil de température de la paroi absorbante dans la direction O_y perpendiculaire à la direction O_x de l'écoulement.

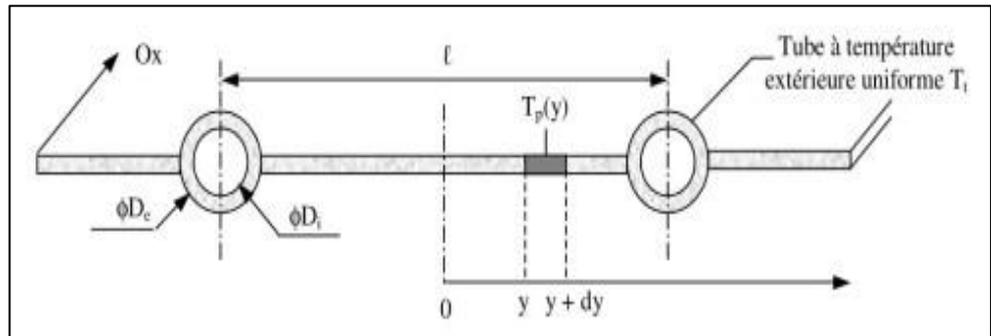


Figure III-4: Schéma en coupe de l'absorbeur

- Le bilan thermique du morceau de plaque de longueur unité compris entre y et $y + d_y$ s'écrit :

$$Q_{sa} - \lambda_p e_p \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_y = -\lambda_p e_p \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y+dy} + h_p (T_m - T_a) dy \quad (\text{III-34})$$

$\lambda_p e_p$: Epaisseur et conductivité thermique de la paroi absorbante.

h_p : Coefficient global de pertes de la paroi absorbante.

Q_{sa} : Densité de flux solaire absorbé par la plaque.

Ce qui peut s'écrire :

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} = \frac{h_p}{e_p \lambda_p} \left(T_p - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p} \right) \quad (\text{III-35})$$

On peut supposer :

$$\overline{\overline{T_p}} = T_p - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p} \text{ et } \omega^2 = \frac{h_p}{e_p \lambda_p} \quad (\text{III-36})$$

On obtient :

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} - \omega \bar{T}_p = 0 \quad (\text{III-37})$$

On résolvant l'équation on obtient à la fin

L'expression du flux utile gagné par chaque tube par unité de longueur dans la direction O_x de l'écoulement [19] :

$$dQ_u = IF'S[\phi_{sa} - h_p(T_f - T_a)] \quad (\text{III-38})$$

Avec :

$$F' = \frac{\frac{1}{h_p}}{I\left[\frac{1}{[(1-D_e)+F+D_e]h_p} + \frac{1}{h_i\pi D_i} + \frac{e_i}{\lambda_i\pi d_i}\right]} \quad (\text{III-39})$$

F' Apparaît comme le rapport de la résistance thermique au transfert entre la plaque et l'extérieur sur la résistance thermique au transfert entre le fluide et l'extérieur . F' est donc un nombre inférieur ou égal à l'unité appelé facteur d'efficacité de la plaque absorbante [19].

La plaque comprise entre $y=0$ et $y=\frac{l-D_e}{2}$ joue en fait le rôle d'ailette de chauffage par rapport au tube.

Le rendement de l'ailette est défini par [19] :

$$F = \frac{\tan h[\omega(1-D_e)]}{\frac{\omega(1-D_e)}{2}} \quad (\text{III-40})$$

III-5-2 Calcul du flux utile [19]:

Le flux utile gagné sur la surface totale $S = IL$ de l'absorbeur peut se calculer par :

$$Q = n \int_0^L d\phi_u dX \quad (\text{III-41})$$

Le calcul de cette intégrale conduit à l'expression du flux utile :

$$Q_u = sF_R[Q_{sa} - h_p(T_{fe} - T_a)] \quad (\text{III-42})$$

Où F_R est le facteur de conductance de l'absorbeur défini par :

$$F_R = \frac{m_f C_f}{sh_p} \left[1 - \exp\left[-\frac{sF'h_p}{m_f C_f}\right] \right] \quad (\text{III-43})$$

III-5-3 Calcul du rendement instantané [19]:

Le rendement global du capteur étudié précédemment s'écrit finalement :

$$n = F_R \left[n_0 - \frac{h_p(T_{fe} - T_a)}{G^*(i, \gamma)} \right] \quad (\text{III-44})$$

III-6 Conclusion :

Dans ce chapitre est présentée la modélisation thermique détaillée d'un chauffe-eau solaire. Pour ceci toutes les équations nécessaire pour le calcul des différentes puissances incidente, perdue, et utile, des pertes thermiques du capteur ainsi que le rendement thermique sont présentées.

Cette modélisation est réalisée et écrite sous langage 'MATLAB', l'outil numérique été utilisé afin d'évaluer le rendement thermique est les puissances. Les résultats de cette modélisation sont présentés dans le chapitre qui suit

Chapitre IV: Simulation et Résultats

Chapitre IV : Simulation et Résultats

IV-1-Introduction:

Dans le présent chapitre, nous avons procédé à une simulation thermique de deux chauffe-eau solaires, l'un est muni d'un récepteur solaire à base de canettes et un autre capteur du commerce (DUROTHERM). La simulation est réalisée à l'aide d'un logiciel SAM.

A travers le présent chapitre nous avons exposé les résultats et de la modélisation réalisée sous langage 'Matlab' et la simulation réalisée à travers du logiciel 'SAM', une comparaison entre les deux résultats a été par la suite établie et discutée.

IV-2-Simulation du chauffe-eau solaire par le logiciel 'SAM' :

IV-2-1-présentation du chauffe-eau simule :

Les caractéristiques physiques des capteurs étudiés (celui du commerce et celui à canettes de soda), sont représentées dans le tableau qui suit :

Tableau IV-1- Caractéristiques du capteur étudié.

	Chauffe-eau solaire commercial	Chauffe-eau solaire à canettes de soda
Matériaux	Cuivre	Aluminium
Nombre de capteurs solaires	1	1
Nombre de collecter	1	1
Nombre des tubes récepteur	7	15
Diamètre des tubes récepteurs	0.013m	0.052m
Surface du collecter	$2m^2$	$2m^2$
le fluide caloporteur	Eau	Eau
Conductivité du récepteur	0.03 W /m.C	0.03 W /m.C



Figure IV-1 schéma montrant la forme du capteur à canettes de soda

IV-2-2 présentation de logiciel de simulation :

Le logiciel 'SAM', est un outil numérique à accès gratuite, développé par le 'USDOE', (United States Departement of Energie) et le 'NREL', (National Renewable Energy Laboratory), il est considéré comme étant un modèle performant conçu pour aider à la prise de décision (en tenant compte des données américaines et des politiques énergétiques) au stade de la planification du projet.

SAM est un modèle technico-économique qui calcule les performances et les paramètres financiers des projets d'énergies renouvelables, il simule la performance de l'énergie solaire photovoltaïque (PV), centrale solaire thermodynamique, du chauffage solaire de l'eau, de l'énergie éolienne, de la géothermie et de la biomasse.

Les données que dispose SAM, sont téléchargées de la base de données nationale sur le rayonnement solaire des États-Unis qui couvre de nombreuses villes du monde entier. Il permet l'importation de données TMY2, TMY3 et EPW.



Figure IV-2 : Page de démarrage du logiciel.

Chapitre IV : Simulation et Résultats

IV-2-3-Présentation du site :

- **Coordonnées géographiques :**

Ville : Blida

Pays : Algérie

Fuseau horaire : GMT +1

L'altitude par rapport au niveau de la mer : 341 m

Latitude : 36.4167°Nord

Longitude : 2.83333°E

- **Les données métrologiques et radiométriques :** sont fournis sous format TMY2, par le logiciel 'SAM'.

IV-2-4 Détail de la Simulation des chauffe-eau solaires par 'SAM' :

La simulation est faite à l'aide du logiciel SAM afin d'évaluer le rendement thermique des deux chauffe-eau solaires celui du commerce et celui à canettes de soda, ceci afin de pouvoir comparer les résultats et connaître la rentabilité du capteur à canettes de soda.

La simulation nous a permis l'estimation des puissances : Q_{utile} est, $Q_{incident}$, Q_{perdue} ainsi que les rendements thermiques et ce pour 4 journées type de l'année (variation saisonnière), la journée la plus favorable de l'année ainsi que la moyenne annuelle journalière, qui sont comme suit :

- Équinoxe de printemps : 21 Mars ;
- Solstice d'été : 22 Juin ;
- Équinoxe d'automne : 23 Septembre ;
- Solstice d'hiver : 22 Décembre ;
- Journée type de l'année : 22 Juillet (journée plus favorable de l'année) ;
- Moyenne annuelle journalière.

Avec :

Q_{utile} , Q_{perdue} (1) : Les puissances en référence au capteur solaire commercial du type (DUROTHERM).

Q_{utile} , Q_{perdue} (2) : Les puissances en référence au capteur solaire fabriqué à base de canettes de soda.

Rendement(1) : En référence au capteur solaire commercial (DUROTHERM).

Rendement(2) : En référence au capteur solaire à base de canettes de soda.

Chapitre IV : Simulation et Résultats

La simulation à l'aide du logiciel SAM a été effectuée pour deux capteurs distincts. L'un du commerce le (DUROTHERM) et l'autre (à étudier) muni d'un récepteur solaire à base de canettes de soda.

IV-2-5 Résultats de la simulation à l'aide du logiciel SAM :

IV-2-5-1 Variation des puissance en fonction du temps solaire vrai :

Les figures représentées ci-dessous (de IV-3 à IV-8) donnent un aperçu des ordres de grandeurs des différentes puissances mises en jeu au sein d'un capteur solaire à savoir la puissance incidente, la puissance perdue, et la puissance utile.

La puissance utile interceptée par le fluide caloporteur dépend fortement de l'éclairement solaire global incident sur la surface du collecteur qui varie au fil de la journée en fonction du temps solaire vrai et dépend aussi de la puissance perdue.

La puissance perdue est due aux déperditions thermiques du capteur vers son milieu environnant à travers ses trois faces. D'après les résultats, on arrive à constater que le capteur étudié (à base de canettes de soda) a un coefficient de déperdition relativement faible par rapport à celui du commerce. Les résultats ont donc révélé que la puissance perdue par le capteur commercial est supérieure à celle du capteur fabriqué à base de canettes de soda.

On a pu aussi constaté que la puissance varie directement avec la variation de la température.

- **Courbes de puissances, équinoxe printemps :**

Dans la figure (Figure IV-3), la puissance utile pour les deux capteurs commence à 7h30 et augmente avec l'augmentation de la puissance incidente jusqu'à atteindre un pic vers midi solaire vrai, d'après les deux courbes de puissances utiles, on remarque que celle du capteur commercial (en vert) est supérieure à celle du capteur fabriqué par les canettes de soda (en rouge).

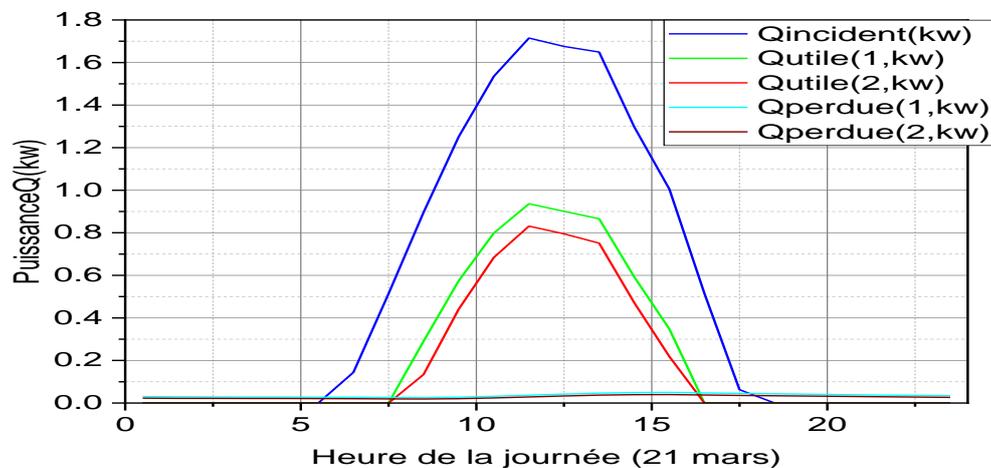


Figure IV-3: Courbes de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (21 mars).

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Courbe de puissance de solstice d'été :**

Sur la figure (Figure IV-4), sont représentées les courbes de puissances utiles pour les deux capteurs, la variation commence à partir de 7h30 et augmente avec l'augmentation de la puissance incidente jusqu'à atteindre un pic vers 11h00 TSV, on remarque que la puissance utile du capteur commercial est supérieure à celle du capteur fabriqué par les canettes de soda, l'allure des courbes diminue jusqu'à s'annuler vers 17h00.

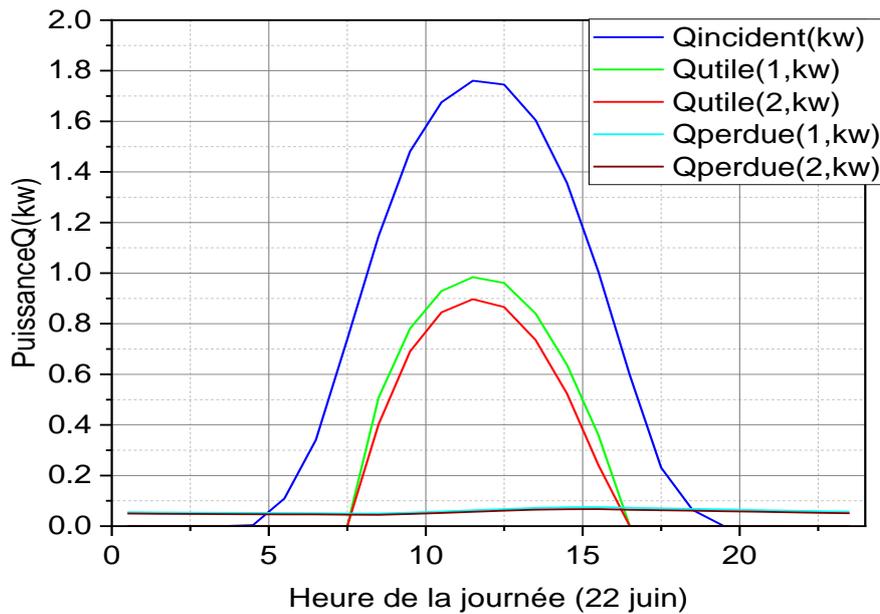


Figure IV-4: Courbes de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (22 juin).

- **Courbe de puissance d'équinoxe d'automne :**

Dans la figure (Figure IV-5), la puissance utile pour les deux capteurs est enregistrée à partir de 7h30 son allure augmente avec l'augmentation de la puissance incidente jusqu'à atteindre un pic vers 12h00 solaire vrai, ceci avant de diminuer et s'annuler vers 16h00. La courbe de puissance utile du capteur commercial est toujours supérieure à celle du capteur fabriqué à base de canettes de soda.

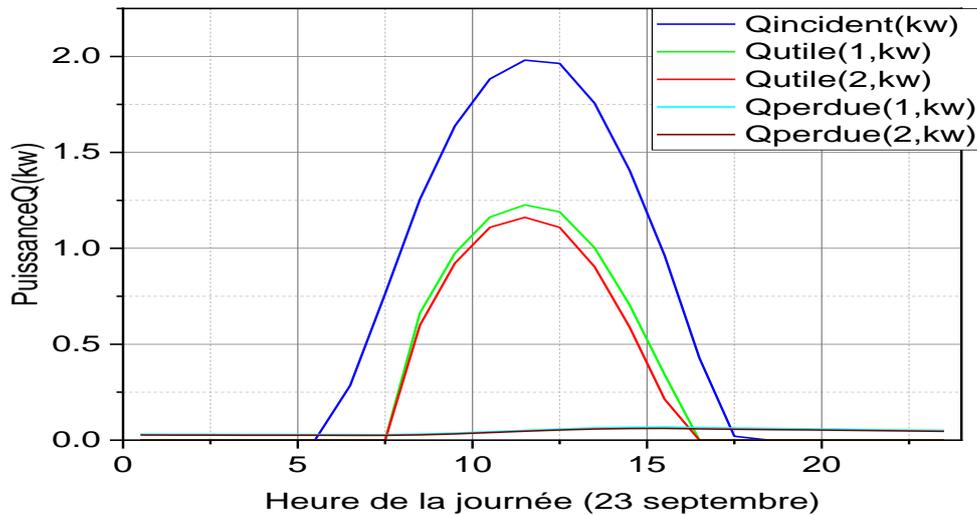


Figure IV-5: Courbes de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (23 septembre).

- **Courbe de puissance solstice d’hiver :**

Dans la figure (Figure IV-6), la variation des puissances utiles pour les deux capteurs commence vers 7h30 et augmente avec l’augmentation de la puissance incidente jusqu’à atteindre un pic vers 12h00 solaire vrai. La courbe des puissances utiles du capteur commercial est supérieure à celles du capteur fabriqué à base de canettes de soda. La puissance utile du capteur commercial diminue jusqu’à s’annuler vers 18h00, tandis que la puissance utile du capteur fabriqué par les canettes de soda s’annule vers 16h00.

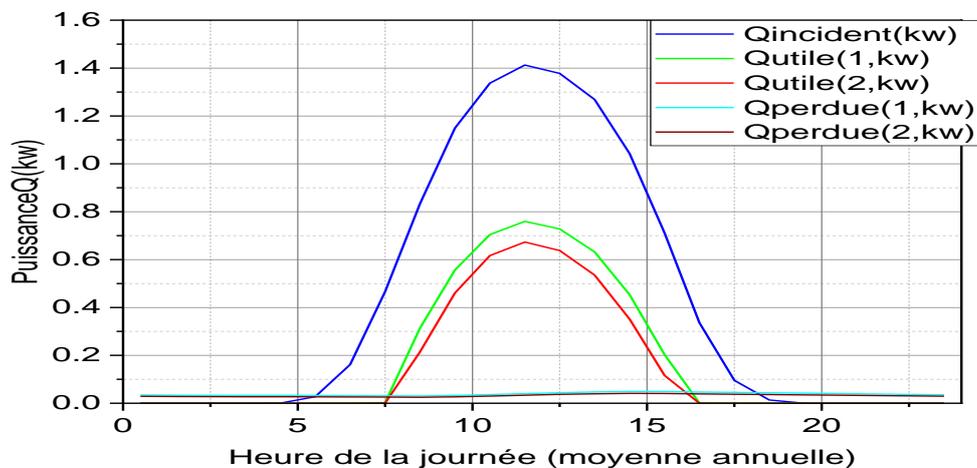


Figure IV-6: Courbes de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (22 décembre).

- **Courbe de puissance, journée favorable de l'année :**

Dans la figure (Figure IV-7), les courbes des puissances utiles pour les deux capteurs commencent à se tracer vers 7h30 et augmentent avec l'augmentation de la puissance incidente jusqu'à atteindre un pic vers 11h30, puis diminuent jusqu'à son annulation vers 16h00.

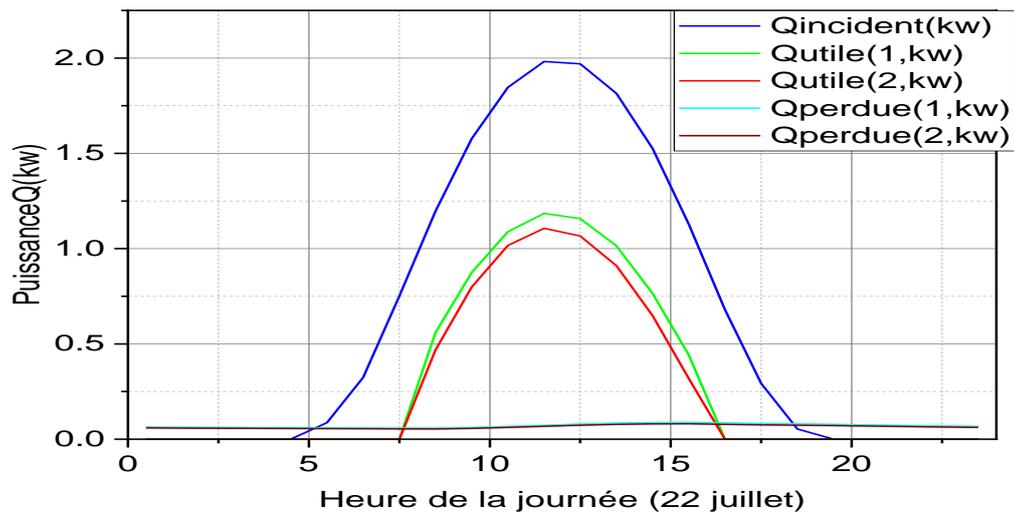


Figure IV-7: Courbes de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (22 juillet).

- **Courbe de puissance, moyenne annuelle journalière:**

Dans la figure (Figure IV-8), sont représentées les courbes de puissances utiles pour les deux capteurs. Les courbes commencent à se tracer à partir de 7h30 et augmentent avec l'augmentation de la puissance incidente jusqu'à atteindre un pic au alentour de 12h00 solaire vrai. L'arrêt de la production pour les deux capteurs est enregistré vers 16h00.

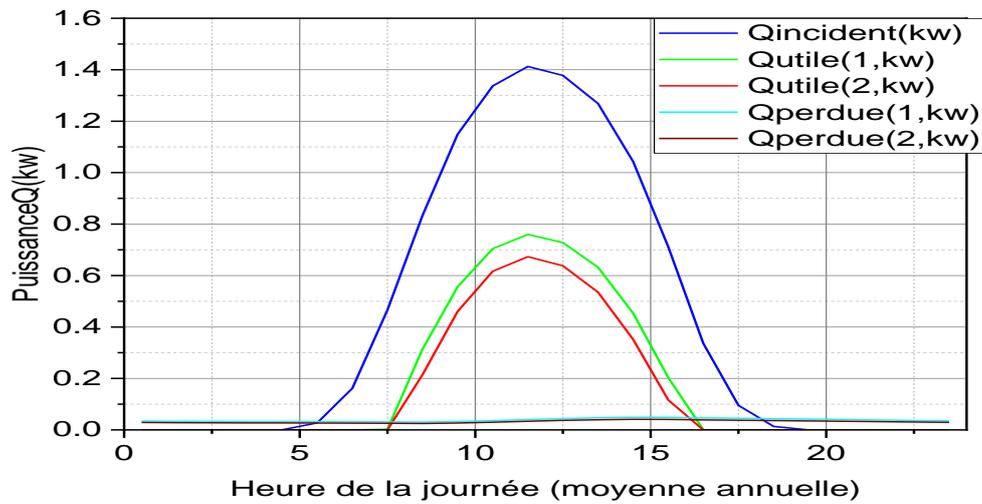


Figure IV-8: Courbes de puissance en fonction du temps solaire vrai pour la journée de (moyenne annuelle).

- **Comparaison des résultats des différentes puissances :**

Dans ce qui suit sont représentés les résultats de la simulation, sous forme de tableaux les

Tableau IV-2 : du résultat de puissance après la simulation avec SAM.

Variation temporelles des différentes Puissance	Chauffe-eau commercial			Chauffe-eau fabriqué à base de canettes de soda		
	$Q_{incident}$ (kW)	Q_{utile} (kW)	Q_{perdue} (kW)	$Q_{incident}$ (kW)	Q_{utile} (kW)	Q_{perdue} (kW)
(Équinoxe du printemps) 21 Mars	1.98094	0.936415	0.0491063	1.98094	0.831065	0.0393543
(Solstice d'été) 22 Juin	1.674904	0.983959	0.0753487	1.674904	0.897217	0.0671853
(Équinoxe)						

Chapitre IV : Simulation et Résultats

d'automne)23 Septembre	1.980984	1.22594	0.0679544	1.16146	1.980984	0.608507
(Solstice d'hiver)22 Décembre	1.600706	0.96677	0.0310621	1.600706	0.912521	0.0256721
(journée favorable de l'année) 22 juillet	1.981689	1.18495	0.0884677	1.981689	1.06657	0.0805008
moyenne annuelle	1.412608	0.759873	0.048898	1.412608	0.67314	0.0409807

IV-2-5-2 Variation du rendement thermique en fonction du temps solaire vrai :

- **Courbes de rendements, d'équinoxe de printemps :**

a figure (IV-9) ci-dessous, montre la variation temporelle du rendement des deux capteurs.

Le rendement du capteur commercial maximal (en bleu) atteint les (54%) vers 12h30 solaire vrai. Tandis que le rendement du capteur fabriqué par les canettes de soda (en rouge) atteint un maximum de (48%) vers 12h30 temps solaire vrai.

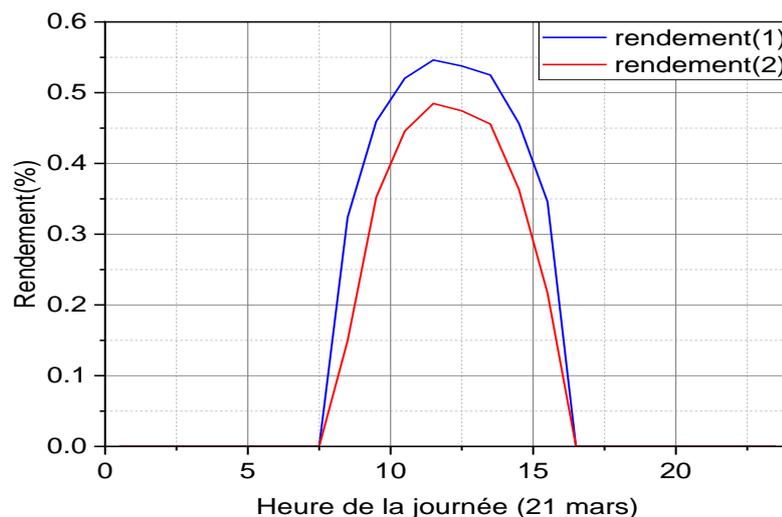


Figure IV-9: Courbe de rendement pour la journée type de (21 mars) .

- **Courbe de rendement de solstice d'été :**

La figure (IV-10) ci-dessous montre la variation temporelle des rendements des deux capteurs. Le rendement maximal du capteur commercial est de (56%). Tandis que le rendement de capteur fabriqué par les canettes atteint un maximum de (52%).

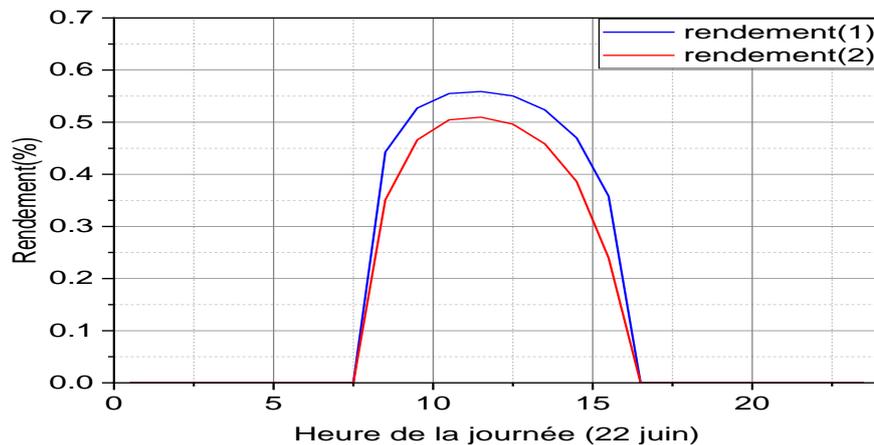


Figure IV-10: Courbe de rendement pour la journée type de (22 juin).

- **Courbe de rendement, équinoxe d'automne :**

La figure (IV-11) ci-dessous montre la variation temporelle du rendement des deux capteurs. Le rendement du capteur commercial atteint une valeur maximale de (61%). Alors que le rendement maximal du capteur fabriqué à base de canettes atteint les (58%).

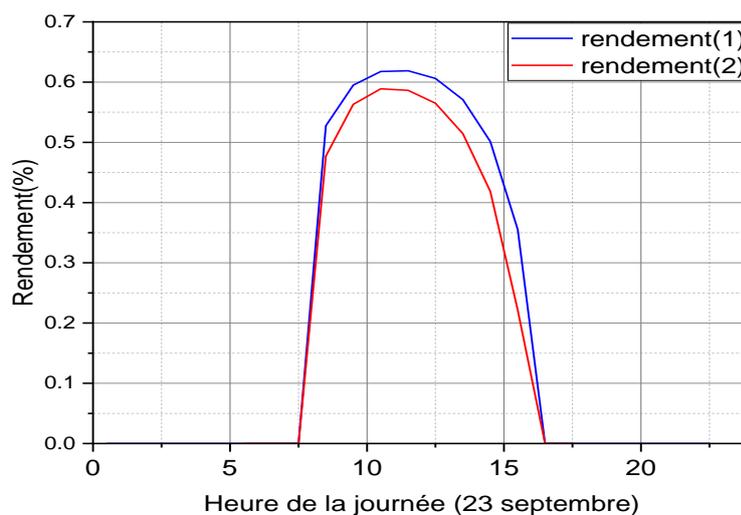


Figure IV-11: Courbe de rendement pour la journée type de (23 septembre).

- **Courbe de rendement de solstice d'hiver :**

On remarque d'après, la figure (IV-12), que le rendement maximal du capteur commercial atteint les (60%), alors que celui du capteur fabriqué par les canettes de soda atteint un maximum de (57%).

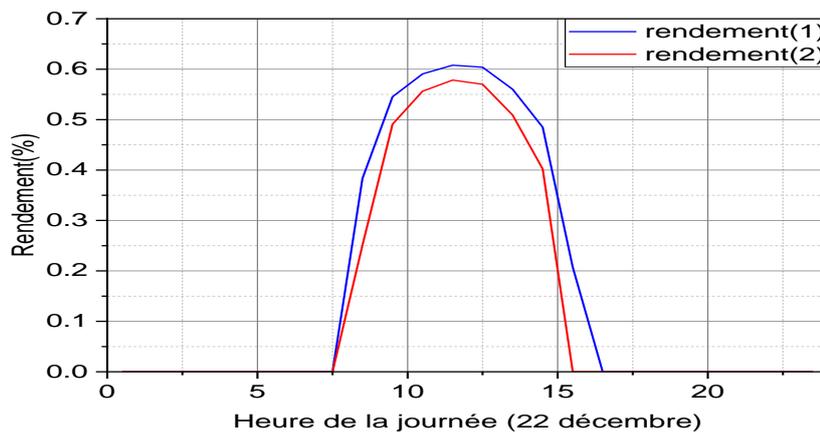


Figure IV-12: Courbe de rendement pour la journée type de (22 décembre).

- **Courbe de rendement de 22 juillet :**

La figure (IV-13) ci-dessous montre la variation temporelle du rendement des deux capteurs. Le rendement maximal du capteur commercial est de l'ordre de (59%). Tandis que celui du capteur fabriqué par des canettes de soda est de l'ordre de (55%).

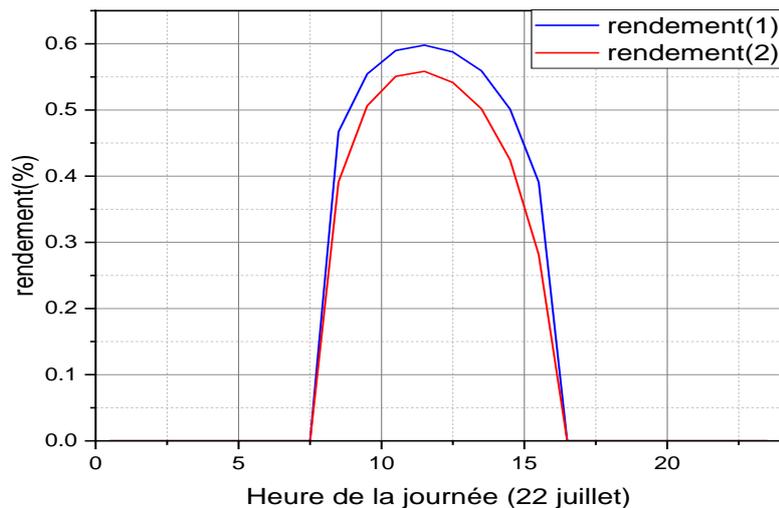


Figure IV-13: Courbe de rendement pour la journée type de l'année (22 juillet).

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Courbe de rendement annuelle :**

La figure (IV-14) ci-dessous montre la variation temporelle des rendements thermiques des deux capteurs. Le rendement du capteur commercial maximal est de l'ordre de (55%). Tandis que le rendement du capteur fabriqué à base de canettes de soda atteint un maximum de (47%).

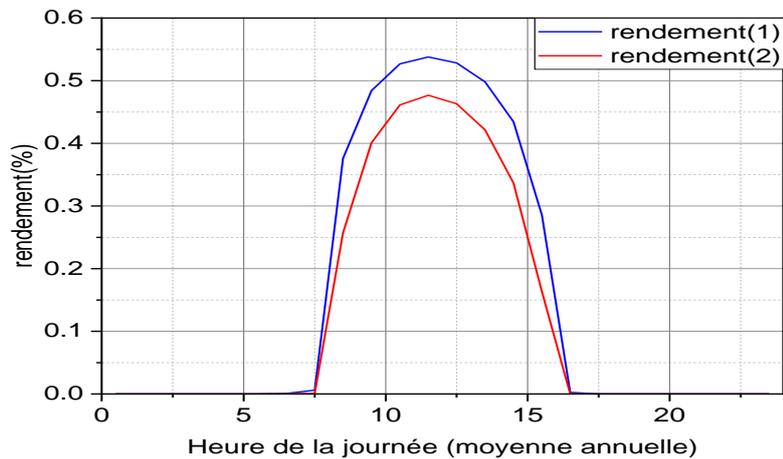


Figure IV-14: Courbe de Rendement de moyenne annuelle.

- **Comparaison des résultats du rendement global :**

Dans ce qui suit les résultats de la simulation en termes de rendement maximal sont présentés sous forme de tableau, on y retrouve les rendements de chaque journée type étudiées pour les deux différents capteurs.

Tableau IV-3 Comparaison des rendements maximaux après la simulation avec SAM.

Variation temporelle du rendement global	Chauffe-eau commerciale	Chauffe-eau fabriqué par les canneté
	Rendement (1)	Rendement (2)
(Équinoxe de printemps) 21 Mars	54%	48%
(Solstice d'été) 22 Juin	56%	50%
(Équinoxe d'automne)23	62%	59%

Chapitre IV : Simulation et Résultats

Septembre		
-----------	--	--

(Solstice d'hiver) 22 Décembre	60%	57%
(jorne de l'année) 23 juillet	60%	56%
Moyenne Annuelle	56%	48%

IV-3 Modélisation des performances thermiques du capteur solaire plan à l'aide de l'outil numérique MATLAB :

La modélisation est réalisée à l'aide du logiciel MATLAB à cet effet toutes les équations présentées dans le deuxième chapitre ont été introduites et écrites sous langage MATLAB, notamment les données physiques des deux capteurs et leurs composants et aussi les données météorologiques et radiométriques du site étudié. Les résultats de la modélisation ont permis le traçage des courbes de puissances : incidentes, perdues et utiles, notamment les courbes des rendements thermiques, ceci pour le capteur solaire commercial ainsi que le capteur fabriqué à base de cannettes de soda.

Dans ce qui suit un organigramme résumant l'acheminement de la modélisation réalisée à travers le logiciel MATLAB.

Le rendement de capteur commercial maximal est de (0.55), tandis que le rendement de capteur fabriqué par les canettes atteint un maximum de(0.47).

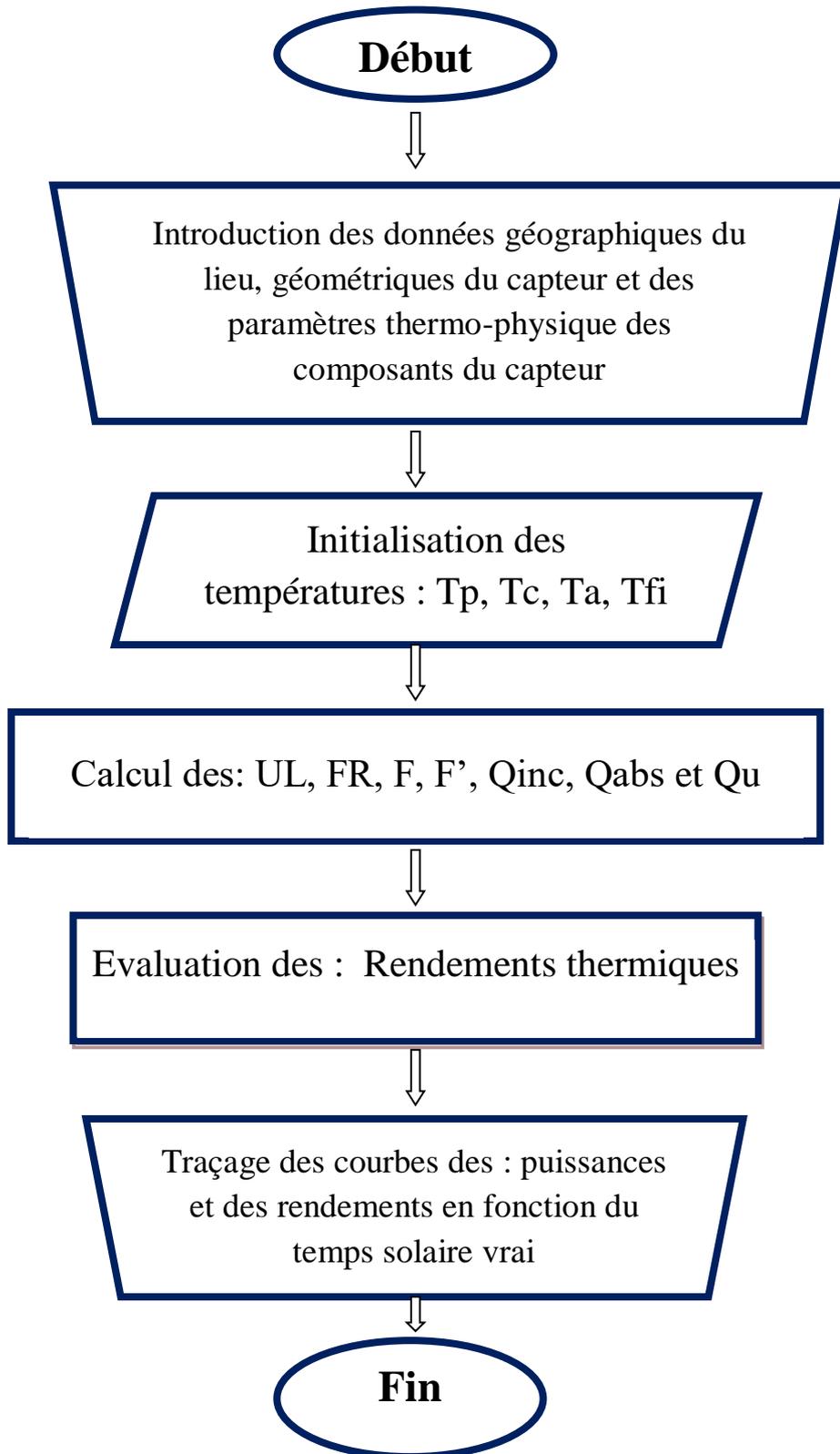


Figure IV-15 : Organigramme du calcul du rendement thermique.

IV-3 -1 Résultats de la modélisation sous langage MATLAB :

Dans ce qui suit les résultats de la modélisation sous forme de courbes de puissances puis de rendements, sont représentés.

IV-3-1-1 Courbes de puissances en fonction du temps solaire vers :

- **Courbes de puissances, solstice été :**

Sur la figure IV-16 : On remarque que la puissance incidente accroit de 250W/m^2 à 7h00 du matin jusqu'à atteindre son pic de 750 W/m^2 correspondant au midi solaire vrai puis redescend progressivement jusqu'à atteindre 270W/m^2 vers 16h45.

On remarque aussi que la forme des courbes des puissances utiles suivent la forme des courbes de puissances incidentes et accroissent des les premières heures du matin à partir de 4h00 précises jusqu'à atteindre le maximum de 1500 W/m^2 vers midi solaire vrai puis redescendent pour atteindre les 210W vers 17h00.

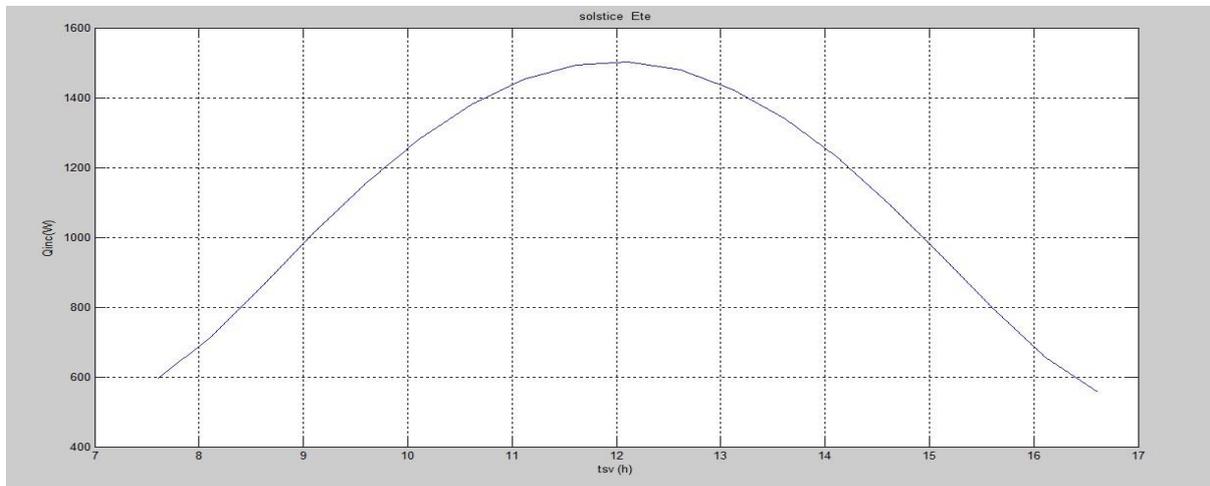


Figure IV-16: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (22 juin).

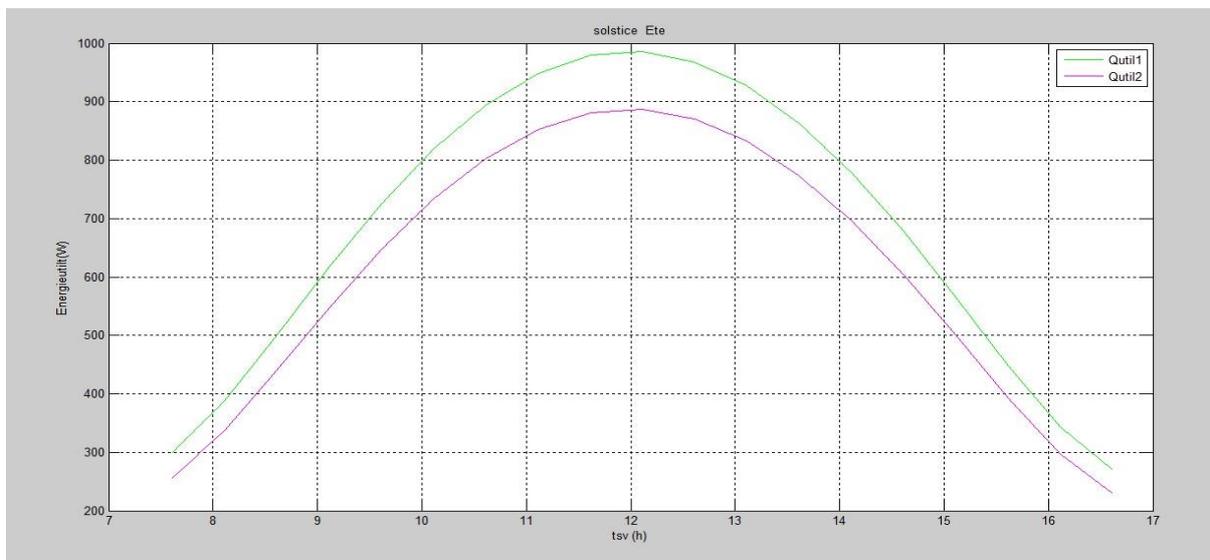


Figure IV-17: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (22 juin).

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Courbes de puissances, solstice hiver :**

A travers la Figure IV-18 : On remarque que pour solstice hiver la puissance incidente accroit de 270W/m^2 a 5h30 du matin jusqu'a atteindre son pic a 750 W/m^2 (correspondant à midi solaire vrai puis redescend progressivement jusqu'a atteindre 260W/m^2 a 19h00.

On remarque aussi que les courbes de puissances utiles accroissent des les premières heures du matin a 4h00 précises jusqu'a atteindre son maximum a 12h puis redescendent pour atteindre 125W vers 18h30.

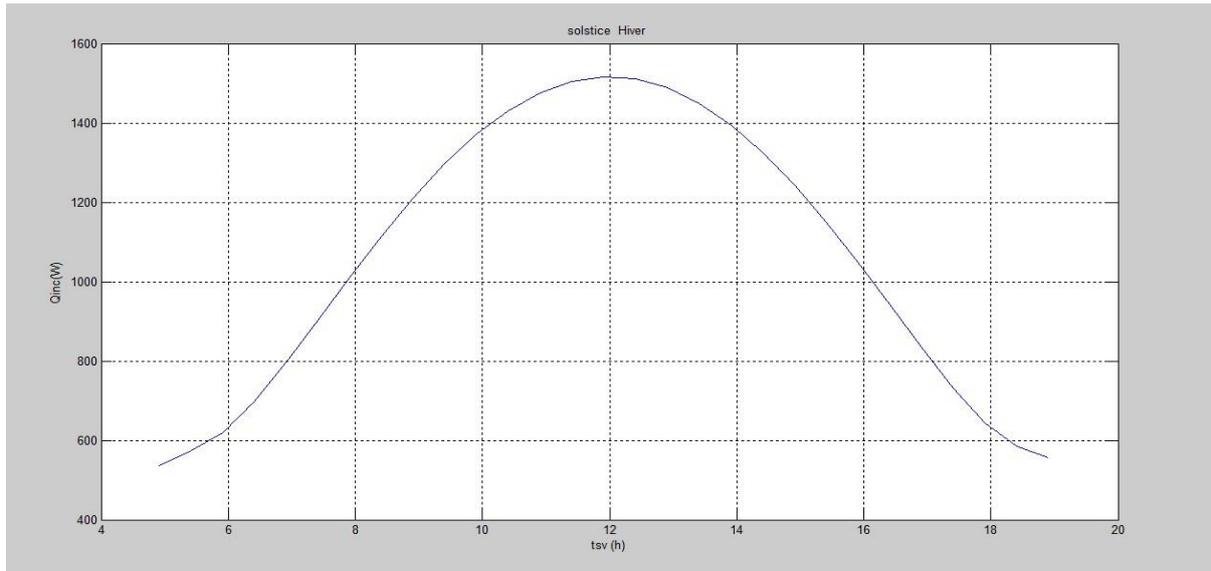


Figure IV-18: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (21 décembre)

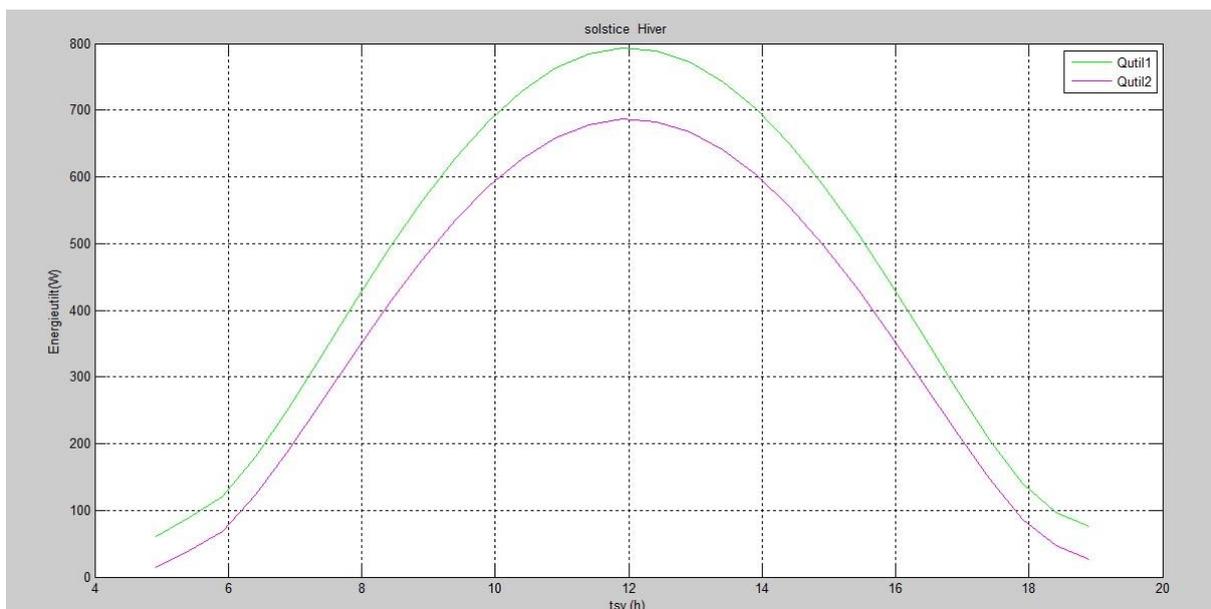


Figure IV-19: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (21 décembre)

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Courbes de puissances, d'équinoxe printemps :**

A travers la Figure IV-20 : On remarque que pour l'équinoxe du printemps la puissance incidente accroit de 250W/m² à 5h10 du matin jusqu'à atteindre un pic de 800 W/m² correspondant à midi solaire vrai puis redescend progressivement jusqu'à atteindre 280W/m² vers 18h00.

On remarque aussi que les puissances incidentes accroissent des les premières heures du matin ceci à partir de 5h00 jusqu'à atteindre un maximum de 1600 W vers 12h30 puis redescendent pour atteindre 100W vers 18h30.

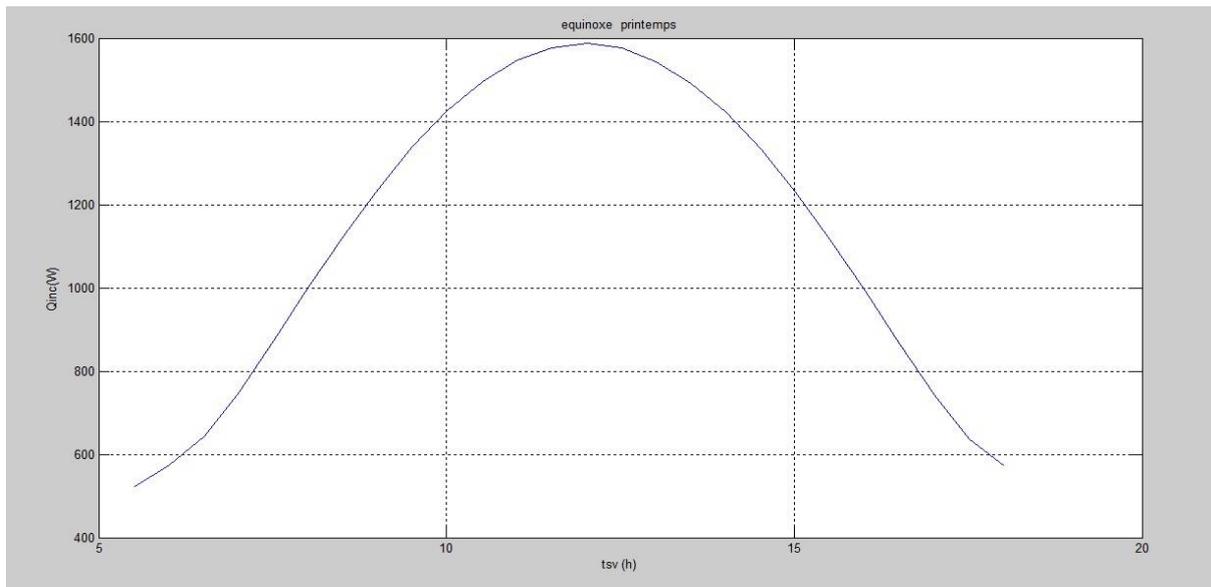


Figure IV-20: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (21 mars).

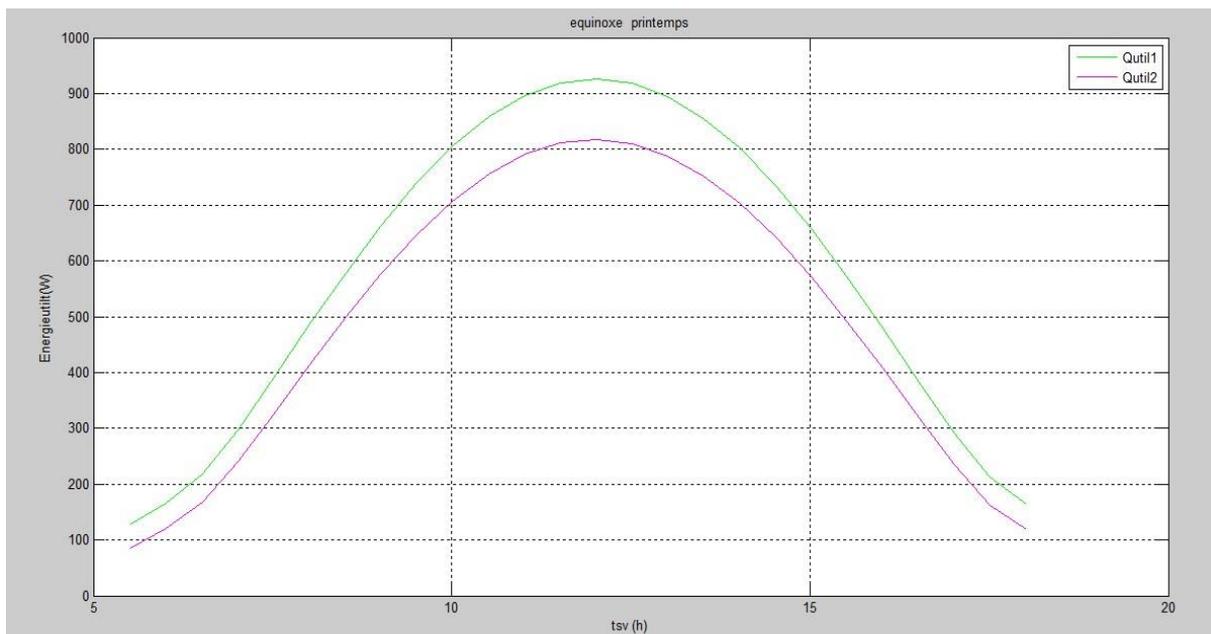


Figure IV-21: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (21 mars).

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Courbes de puissances, équinoxe d'automne :**

D'après la Figure IV-22 : On remarque que pour l'équinoxe d'automne la puissance incidente varie de 250W/m^2 vers 6h20 du matin jusqu'à atteindre un pic de 810W/m^2 au alentour de midi solaire vrai puis redescend progressivement jusqu'à atteindre 280W/m^2 a 17h15.

On remarque aussi que les puissances utiles augmentent des les premières heures du matin ceci à partir de 6h00 précises jusqu'à atteindre son maximum de 1650W vers midi solaire vrai puis redescendent pour atteindre les 100W vers 17h30.

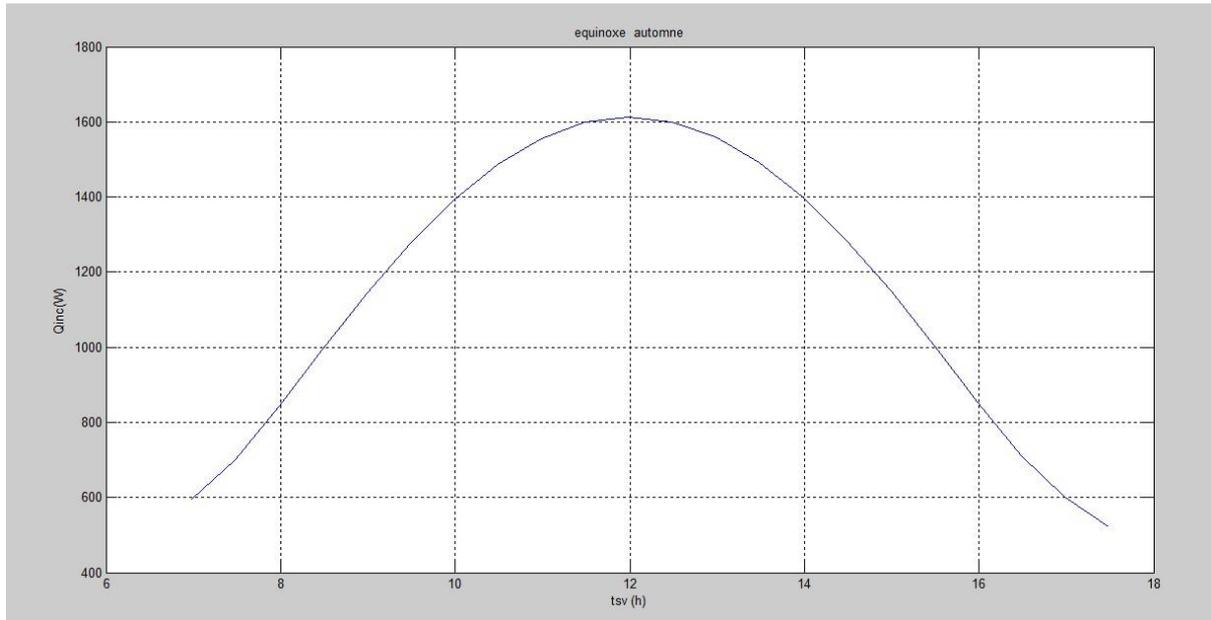


Figure IV-22: Courbes de puissances en fonction du temps solaire vrai du (23 septembre).

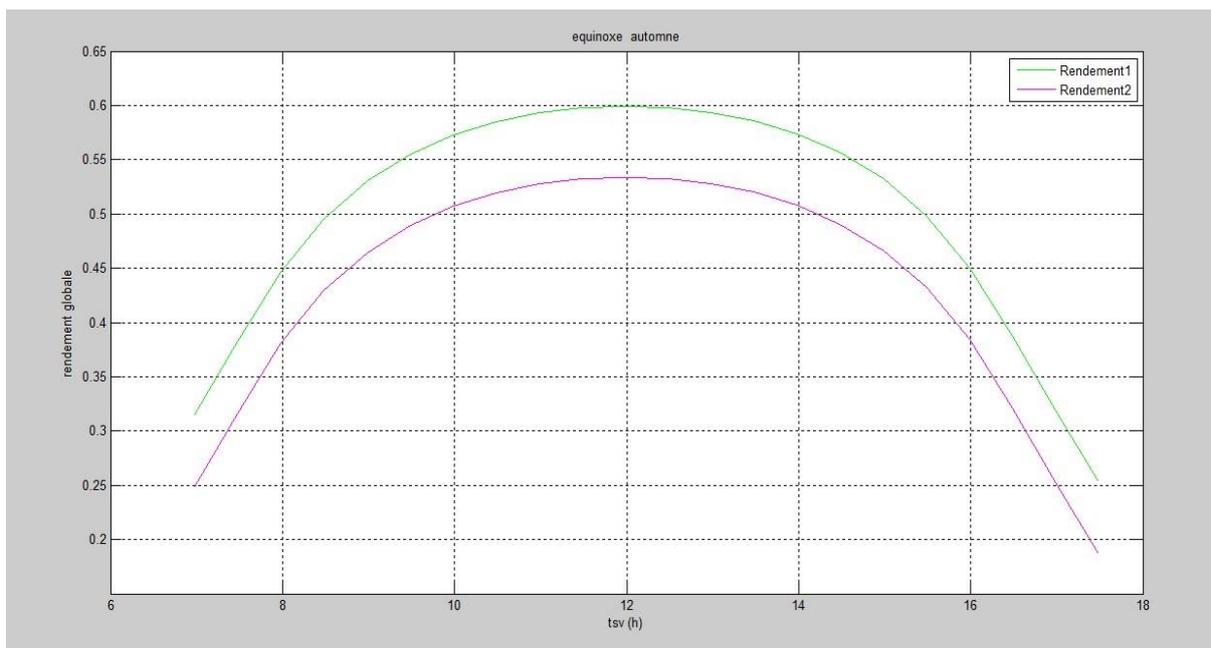


Figure IV-23: Courbe d'énergie utile en fonction du temps solaire vrai du (23 septembre)

IV-3 -1-2 Courbes de rendements en fonction du temps solaire vrai:

- **Courbe de rendements, équinoxe d'automne :**

L'analyse de l'allure de la courbe des rendements (Figure IV-24) montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée vers 6h15 pour atteindre des valeurs maximales entre 11h00 et 13h00 60% puis s'annule vers 18h00.

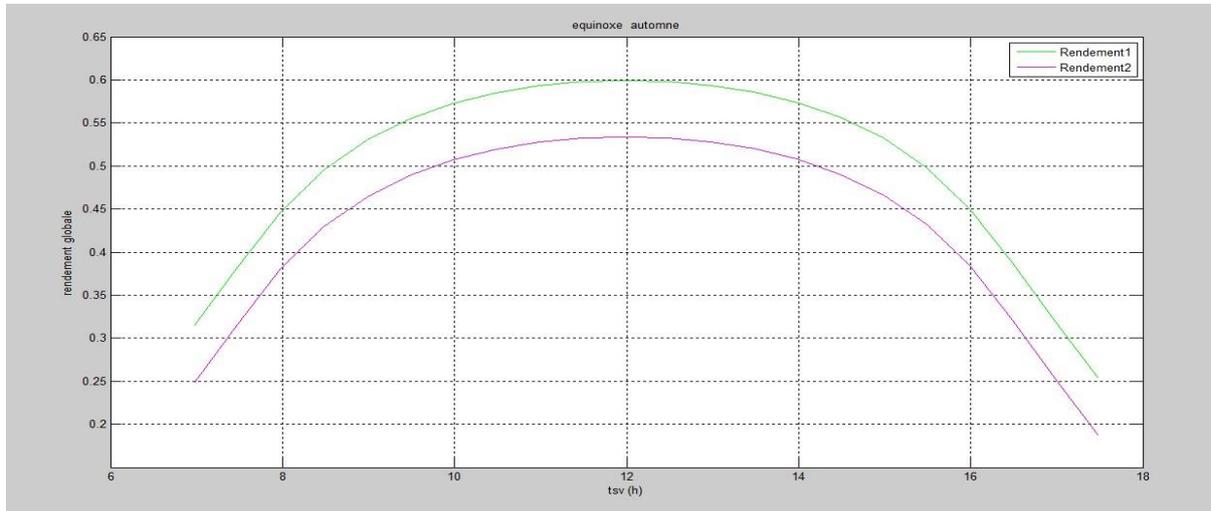


Figure IV-24: Courbe de rendement pour la journée type du (23 septembre).

- **Courbe de rendement, équinoxe du printemps :**

L'analyse de l'allure de la courbe des rendements pour l'équinoxe du printemps (Figure IV-25) montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée vers 5h15 pour atteindre des valeurs maximales 57% entre 12h00 et 13h00 et se termine vers 19h00.

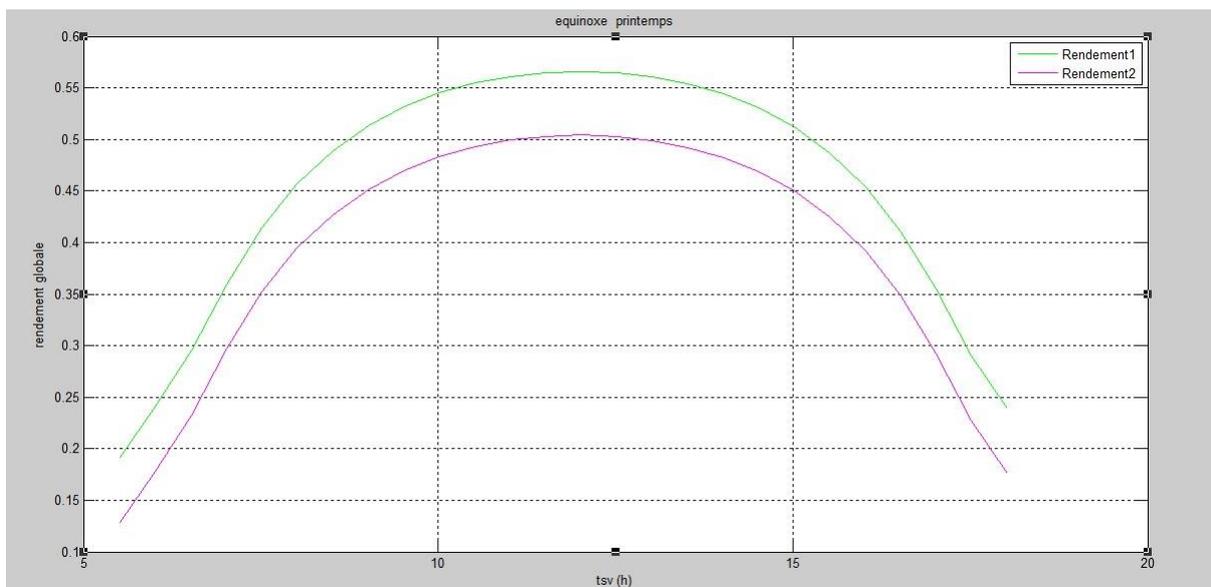


Figure IV-25: Courbe de rendement pour la journée type du (21 mars).

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Courbe de rendement, solstice hiver :**

L'analyse de l'allure de la courbe des rendements pour le solstice d'hiver, figure IV-26 montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales 50% vers 12h00.

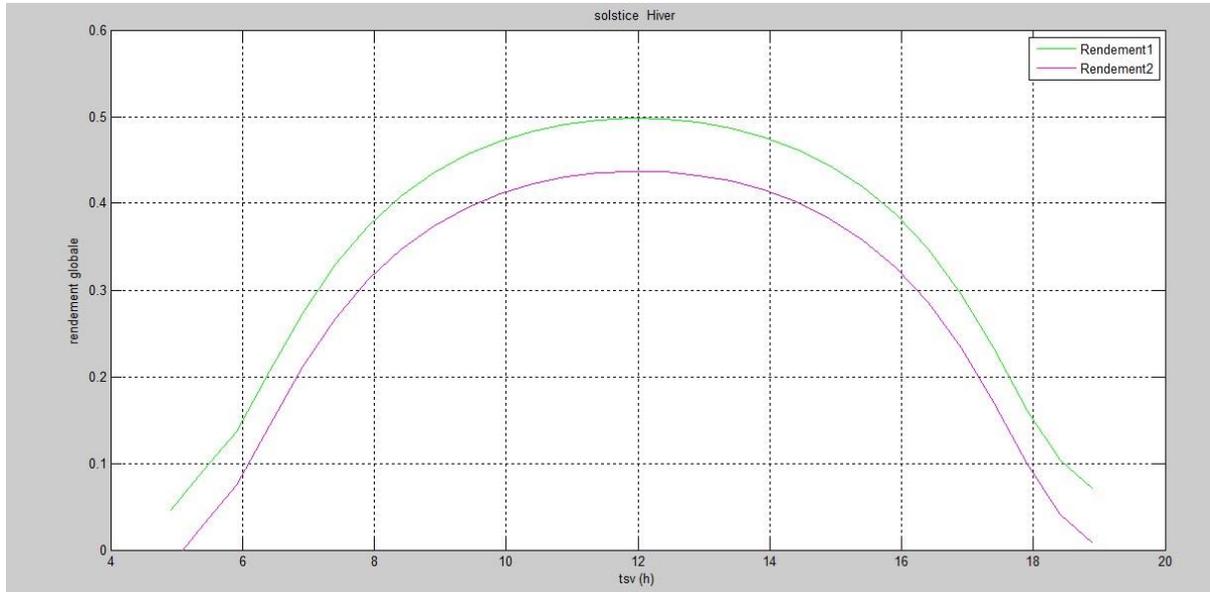


Figure IV-26: Courbe de rendement pour la journée type du (21 décembre).

- **Courbe de rendement, solstice été :**

L'analyse de l'allure de la courbe des rendements pour le solstice d'été, figure IV-27, montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée vers 7h15 pour atteindre des valeurs maximales combinées 64% entre 12h00 et 13h00 et se termine vers 15h15.

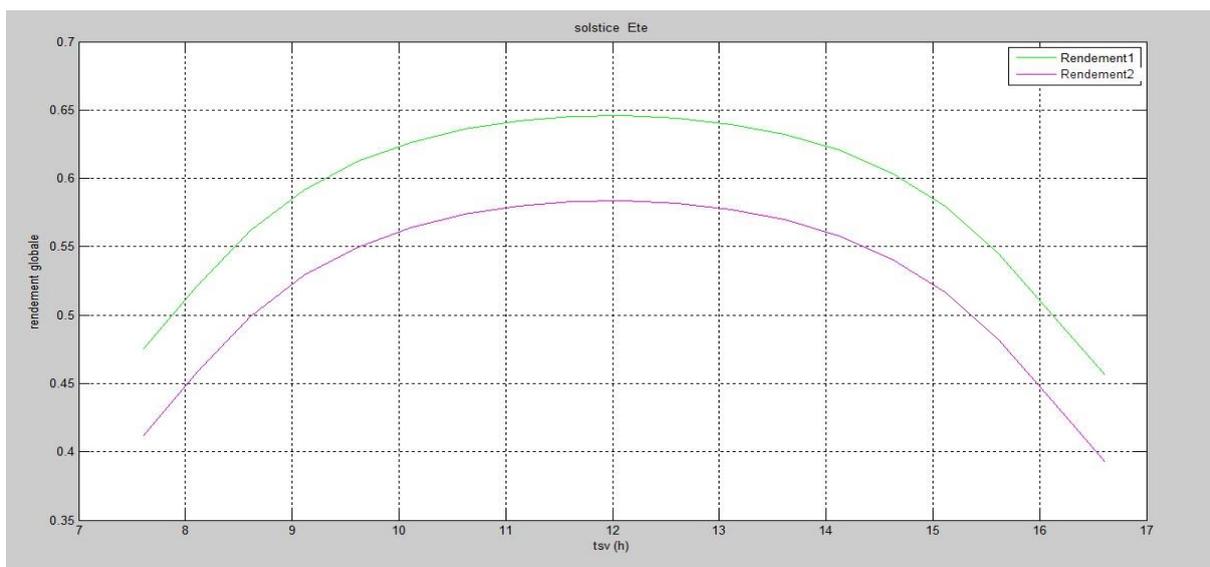


Figure IV-27: Courbe de rendement pour la journée type du (21 juin)

Chapitre IV : Simulation et Résultats

- **Comparaison entre les résultats obtenus par la simulation et ceux obtenus par la modélisation :**

A titre comparatif, un tableau récapitulatif contenant les résultats de la simulation et ceux de la modélisation est présenté en (Annexe 03).

IV-4 -Conclusion :

A travers le présent chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation réalisée à travers le logiciel (SAM), sous forme de courbe de puissances incidentes, puissances utiles et rendements. Ceci pour quatre journées types de l'année (montrant la variation saisonnière), une journée représentative de l'année (moyenne annuelle journalière) et pour la journée la plus favorable de l'année. Aussi nous avons présenté sous forme de courbes de puissances et de rendements les résultats de la modélisation réalisée sous langage (MATLAB). Une comparaison entre les résultats appartenant au capteur commercial et le capteur à absorbeur solaire à base de canettes de soda a été aussi présentée.

CONCLUSION GENERALE :

L'étude que nous venons de présenter, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances sur les systèmes solaires, et précisément les chauffe eau-solaires thermiques, qui fonctionnent selon un principe simple et efficace, consistant à convertir les rayons électromagnétiques du soleil, en une énergie calorifique qui serait transmise à l'eau et ce pour des besoins domestiques (cas échéant) ou pour des procès industriels.

Le but principal de ce modeste travail est l'étude des performances thermiques d'un chauffe eau-solaire, muni d'un récepteur à base de canettes de soda ceci afin de connaître et d'une manière concrète, la rentabilité et l'utilité d'un tel type de construction issue de canettes de sodas utilisées (revalorisation de déchet). Pour ceci nous avons subdivisé notre travail en quatre grandes parties. Un premier chapitre, qui était consacré au gisement solaire. Puis un deuxième chapitre qui à travers lequel nous avons présenté des généralités sur les chauffe eau-solaires (CES), leur principe de fonctionnement, leur composants et les principaux types de capteurs existants. Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation thermique d'un chauffe eau solaire, à travers ce chapitre nous avons exposé toutes les équations qui nous ont permis d'écrire le programme numérique, sous langage Matlab et permis de tracer les courbes de performances du dispositif étudié. Nous avons présenté par la suite dans le chapitre quatre les résultats et de la simulation qui a été réalisée par le logiciel SAM (System Advisor Model) et la modélisation réalisée sous MATLAB, une comparaison entre un capteur du commerce (DUOTHERM) et celui étudié (à récepteur solaire à canettes) a été présentée et discutée.

Les résultats obtenus par le logiciel SAM ont montré une différence de rendement entre le capteur solaire commercial et le capteur à canettes de soda. Il a été remarqué que les performances thermiques (le rendement thermique et la puissance utile) du capteur commercial sont plus élevés que ceux du capteur à canettes de soda, ce qui est tout à fait logique et peut être justifié par le grand diamètre des canettes en comparaison avec le diamètre des tubes récepteurs du capteur commercial provoquant des pertes thermiques et pertes de charge à l'intérieur des canettes. Les résultats de la modélisation sous Matlab ont donné des valeurs de rendement et de puissance utile supérieures au capteur commercial par rapport aux résultats obtenus de la modélisation sous SAM qui n'était pas du tout attendue, du fait de paramètres simplifiés ou par fois négligés tels les températures ambiantes du fait de paramètres simplifiés ou négligés tels les températures ambiantes (considérées fixes),

(considérées fixes), température de sortie, débit d'eau à l'intérieur des tubes récepteurs, ainsi qu'au modèle d'équation utilisé.

Le présent travail a révélé des résultats peu concluants pour affirmer la rentabilité de ce genre de dispositifs (capteur à eau à canettes de soda) ou le contraire. Pour ceci, il serait recommandé pour une future étude d'inclure et considéré plus de variables (variation journalière de la température ambiante, vitesse du vent instantanée, débit de circulation d'eau à l'intérieur des canettes), et revoir de plus près le modèle d'équations utilisé pour l'estimation des pertes thermiques au niveau des tubes récepteurs.

Annexes1: Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan

Les propriétés thermophysiques des matériaux pouvant constitués la plaque absorbante d'un capteur solaire plan sont récapitulées dans le tableau 1.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg.K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09
Acier inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des matériaux métalliques

Les différentes surfaces sélectives ainsi que leurs propriétés optiques sont regroupés dans le tableau 2.

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes, sont listées dans le tableau 2.A.

Matériau	Epaisseur (mm)	Transmissivité (%)	Masse Volumique (kg/m ³)	Chaleur Massique (j/kg.K)	Conductivité Thermique (W/m.K)
Verre à vitre	3	85-92	2700	840	0.93
Polycarbonate	3.2	82-89	1200	1260	0.2
Poly méthacrylate	3.2	89-92	1200	1460	0.2
Polyester armé	1	77-90	1400	1050	0.21
Polyfluoéthyle Propylène	0.05	97	2.51	1170	0.25

Poly fluorure vinyle	0.1	93	1.5	1380	0.12
-------------------------	-----	----	-----	------	------

Tableau. 2. .Propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes

Matériaux	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Glace lisse	0	0.97
Fer poncé	20	0.24
Verre	90	0.94
Cuivre légèrement ternis	20	0.04
Cuivre oxydé	130	0.76
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

Tableau 3. Degré d'émissivité de quelques matériaux

Annexe 02 : Dossier descriptif du chauffe-eau solaire

Dénomination commerciale du CES :

Chauffe-eau Solaire DUROTHERM 200-2m²

Installateur : Unité de Développement des Equipements Solaires - UDES

Fournisseur: SINES INDUSTRIE

Descriptif technique des équipements :

I— Descriptif :

1.1 - Présentation

Dénomination commerciale du CESI : DUROTHERM 200-2m²

Dénomination commerciale du capteur solaire :1013B

Fabricant Capteur :ΣHE /SINES Industrie Pays d'origine :Grèce

Fabricant Ballon : SINES INDUSTRIE Pays d'origine : TUNISIE.....

1.2 - Caractéristiques générales :

Principe de fonctionnement :

Thermosiphon direct Thermosiphon indirect

Circulation forcée Sous vide

Superficie d'entrée: 1,78m² Volume du réservoir de stockage : 190litres

Poids à-vide :74kg Poids en charge : 332kg

Nombre de capteurs solaires : 1

1.3- Caractéristiques du capteur solaire :

1.3.1 - Absorbeur

Matériau de la grille: Cuivre Nombre de tubes : 7

Diamètre des tubes : 13 mm Diamètre des collecteurs : 22mm

Matériau des ailettes: Aluminium Nombre d'ailettes : Plaque entière (Full size)

Moyen adopté pour la liaison ailettes/tubes : Adhésion par pression

Revêtement des ailettes : Peinture Sélective

1.3.2 - Coffre :

Matériau du coffre ; Cadre : Aluminium Fond : Tôle Galvanisée

Protection contre la corrosion : Peinture Electrostatique de Polyester pur

Epaisseur du coffre : Cadre : 0,8-1mm Fond : 0,5mm

Orifices d'aération : Nombre : 2 Position ; Fond du capteur

1.3.3- Isolant :

Nature de l'isolation du fond : Laine de verre... Epaisseur : 40mm

Nature de l'isolation latérale : Laine de verre .. Epaisseur : 20mm

1.3.4- Couverture transparente :

Nature de la couverture: Vitre solaire trempé (securit) prismatique à faible teneur en fer (Extra Clear)

Epaisseur de la couverture : 4mm

Etanchéité couverture/coffre : Silicone et Joint en EPDM

Isolation:

Nature de l'isolant : Polyuréthane à réaction écologique

Epaisseur: 50mm Densité: 43-45 kg/m³

Mode de réalisation : Injection

1.3.5- Caractéristiques physiques et dimensionnelles :

Dimensions hors tout (mm) :	1990 x 990 x 88
Surface hors tout (m ²) :	1,97m ²
Superficie d'entrée (m ²)	1,78m ²
Pression maximale admissible (bars)	10bar
Poids à vide (kg) :	35Kg
Contenance en eau de l'absorbeur (litres) :	2.15litres
Rendement optique du capteur (ao) :	0,78
Coefficient de pertes du 1 ^{er} degré (ai.) :	5,6W/K/m ²
Coefficient de pertes du 2 ^{er} degré (a ₂) :	0,011W/K/m
Coefficient d'absorption B :	0.79
Coefficient de déperditions thermiques K :	6,41W/m ² / °C
Fluide caloporteur :	eau

Annexe 03 :

Tableau 4 : La comparaison entre les deux résultats

Résultat de la Simulation par SAM				Résultat de la Simulation par MATLAB				
Chauffe-eau commerciale		Chauffe-eau fabrique par les canneté		Chauffe-eau commerciale		Chauffe-eau fabrique par les canneté		
$Q_{incident}$ (W)	Q_{utile} (W)	$Q_{incident}$ (W)	Q_{utile} (W)	$Q_{incident}$ (W)	Q_{utile} (W)	$Q_{incident}$ (W)	Q_{utile} (W)	
1980.94	936.415	1980.94	831.065	1600	920	1600	810	Équinoxe de printemps
1674.904	983.959	1674.904	897.217	1500	990	1500	880	Solstice d'été
1980.984	1225.94	1980.984	1161.46	1620	980	1620	880	équinoxe automne
1600.706	966.77	1600.706	912.521	1460	790	1460	680	solstice hiver

Résultat de la Simulation par SAM		Résultat de la Simulation par MATLAB		
Chauffe-eau commerciale	Chauffe-eau fabrique par les canneté	Chauffe-eau commerciale	Chauffe-eau fabrique par les canneté	
Rendement (1)	Rendement (2)	Rendement (1)	Rendement (2)	
54%	48%	57%	51%	Équinoxe de printemps
56%	50%	65%	58%	Solstice d'été
62%	59%	60%	53%	équinoxe automne
60%	57%	50%	43%	solstice hiver

Références

- [1] S. Khalfallaoui, Dominique Seguin, Moulay Ahmed Abdelghani-Idrissi, “Étude d’un système solaire thermique ”, Université de Rouen, 8 Rue Lavoisier – 76821 Mont Saint Aignan Cedex.
- [2] S. Saadi, “ Effet des paramètres opérationnels sur les performances d’un capteur solaire plan”, mémoire de magister, université Mentouri de Constantine, (2010).
- [3] Albert Fourny et Marianne Wojcik, Texte de la conférence présentée le 10 mai 2000, au CRDP de Nancy : Conférence de Monsieur Hervé Le Treut, directeur de recherche au Laboratoire de Météorologie Dynamique (Unité mixte de recherche : CNRS, École Normale Supérieure, École polytechnique, Université Paris VI).
- [4] Tabet Ismail - étude d’un distillateur solaire a cascade thèse -magister en physique option : énergies renouvelables- 2010.
- [5] rapport : le gisement solaire [Quali’PV]. Formation Générateur PV raccordé (élec) 2008
- [6] Robert Celaire «Les chauffe-eau solaires Capteur-Stockeurs», Gret, GERES, SYNOPSIS Fra.
- [7] Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette - La Météorologie 8esérie - n°31 - septembre 2000 nce Janvier 1987.
- [8] Ch. Perrin de brichambaut, Ch.Vauge. Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris, France 1981.
- [9] <http://www.outilssolaires.com/glossaire/prin-1geometrie.htm>.
- [10] Sonalgaz - Potentialités et perspectives pour les Energies renouvelables en Algérie - Séminaire Algéro-Allemandsur le partenariat dans le domaine de l’Energiesolaire Hôtel EL DJA ZAIR le 25 janvier 2011.
- [11] J, Bernard.Energie solaire, Calculs et optimisation (2004).
- [12] A, Sfeir; G; Guarracino.Ingénierie des systèmes solaires, Technique et documentation .Paris(1981).
- [13] D, K,Edwards.Capteurs solaires.Edition SCM, Paris(1979).
- [14] Pierre Bessemoulin et Jean Olivier, le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette-La Météorologie 8ème série n°31-Septembre(2000).
- [15] : DRIF Idir. MEMOIRE DE FIN D’ETUDE. Bilan thermique d’un chauffe-eau solaire. UMMTO 2012/2013
- [16] Mr Reddah Takieddine, Etude et dimensionnement d’un système solaire combiné Application: Logement individuel type F3 à Batna Soutenu le 15/02/2015

- [17] <https://sam.nrel.gov/>
- [18] J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [19] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal process. New York: Wiley; 1980.
- [20] Mémoire TALAMALI Donia Simulation des performances d'un chauffe-eau solaire (2016).
- [21] Source : Rohsenow WM , Hartnett JP, Handbook of heat transfer, McGraw-Hill, 1998.
- [22] D'après DGS Solar Anlagen – 2001.
- [23] Tirée du livre « océans et atmosphère »).
- [24] Brchambaut, 1982.
- [25] Capderou, 1987.
- [26] Aghilas Brahim. Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau. Génie des procédés. 2016. ffhal-01825548f.
- [27] Sonalgaz - Potentialités et perspectives pour les Energies renouvelables en Algérie - Séminaire Algéro-Allemandsur le partenariat dans le domaine de l'Energiesolaire Hôtel EL DJAZAIR le 25 janvier 2011.
- Web graphie :
- <http://www.outilssolaires.com/glossaire/prin-1geometrie.htm>.
- <https://sam.nrel.gov/>.

