

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'Automatique et Électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Science Et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergie Renouvelable en Mécanique

Thème

**Orientation et inclinaison judicieuse d'un capteur
thermique, Application à un chauffe-eau solaire**

Présentées par :

BENHOUIT Aymane & MEKKAOUI Mohammed Cherif

Soutenu publiquement en Septembre 2024

Devant le jury composé de :

BENHALIMA Ouissem	Maître de Conférences B	Université de Ghardaïa	Président
BELGHERRAS Sifia	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Encadreur
BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Directeur de Recherche	URAER - Ghardaïa	Co-encadreur
BENYELLOUL Kamel	Directeur de Recherche	URAER - Ghardaïa	Examineur
SEBA Hadj Yahia	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2023 / 2024

DEDICACES

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de
fin d'études*

*À mes très chers parents, **BENHOUIT Ben Harzallah & BELLAHBIB Mira** qui
ont toujours été là pour moi,*

*J'espère qu'un jour, je peux rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que Dieu
leur prête bonheur et longue vie.*

*À mes très chers frères, **Omar et Toufik***

*À toute ma famille **BENHOUIT et BELLAHBIB***

À tous mes collègues de la promotion énergie renouvelable en mécanique

*Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon
attachement.*

À tous (es) qui ont contribués de près ou de loin à ma réussite.

Benhouit Aymane

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de
fin d'études*

*À mes très chers parents, **MEKKAOUI Belkacem** & **BELMAZOUZI Reggaya** qui
ont toujours été là pour moi,*

*J'espère qu'un jour, je peux rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que Dieu
leur prête bonheur et longue vie.*

À mes très cher frère et sœurs

*À toute ma famille **MEKKAOUI** et **BELMAZOUZI**.*

À tous mes collègues de la promotion énergie renouvelable en mécanique

*Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon
attachement.*

À tous (es) qui ont contribués de près ou de loin à ma réussite.

Mekkaoui Med Cherif

REMERCIEMENTS

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au
Département d'Automatique et Électromécanique de l'université de
Ghardaia*

*Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout-
Puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a
Donné durant toutes ces longues années.*

*Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à nos
encadreurs **Dr. BELEGHERRAS Sifia** et **Dr BEKKAOUCHE Sidi
Mohammed El Amine** pour nous avoir d'abord proposé
ce thème et le suivi continu tout au long de ce travail, et à qui
n'ont pas cessé de nous prodiguer leurs conseils et remarques.*

*Nos sincères remerciements s'adressent à messieurs les membres du
jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant au
jugement de ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du
département d'électrotechnique qui ont contribué à notre
formation.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et
collègues pour leur soutien moral et matériel*

*BENHOUIT Aymane &
MEKKAOUI Mohamed Cherif*

Résumé

Dans ce travail, nous étudions l'utilisation de l'énergie solaire dans les capteurs solaires plans en vue de produire de l'eau chaude. L'objectif est de simuler un capteur solaire plan à eau appliqué au site de Ghardaïa. Le programme nous a permis de faire un diagnostic adéquat des paramètres d'optimisation. À cet effet, un système d'équations différentielles ordinaires non-linéaires a été développé pour l'étude des paramètres d'optimisation. Le rendement du capteur peut être amélioré à presque 67% à une température de l'eau de l'alimentation au voisinage de la température ambiante. Il peut atteindre les 68% pour des faibles distances entre la vitre et l'absorbeur. Il peut être aussi maximal en faisant une moyenne des angles optimaux, sur toute une année, une saison, un mois ou une période bien déterminée. Encore plus, l'adoption d'une couche sélective améliore le rendement à une moyenne de 2.58 %.

Mots clés

Chauffe-eau solaire, Pertes globales, Puissance thermique utile, Couche sélective, Orientation, Inclinaison optimale, Rendement.

Abstract

In this work, the use of solar energy in flat-plate solar collectors to produce hot water was studied. The aim is to simulate a flat-plate solar water collector applied to the Ghardaïa site. The simulation program enabled us to make a proper diagnosis of the optimization parameters. To this end, a system of nonlinear ordinary differential equations was developed to study the optimization parameters. The collector's efficiency can be improved to almost 67% at a supply water temperature close to the ambient temperature. It can reach 68% for small distances between the glass and the absorber. It can also be maximized by averaging the optimum angles over an entire year, season, month or specific period. What's more, the adoption of a selective coating improves yield to an average of 2.58%.

Key words

Solar water heater, Global heat losses, Useful thermal power, Selective coating, Orientation, Optimal inclination, Efficiency.

المخلص

في هذا العمل، ندرس استخدام الطاقة الشمسية في المجمعات الشمسية ذات الألواح المسطحة لإنتاج الماء الساخن. الهدف من ذلك هو محاكاة لاقط شمسي مسطح يستعمل لتسخين الماء مركب في غرداية. مكّنا برنامج المحاكاة من إجراء تشخيص مناسب لمعايير التحسين. وتحقيقاً لهذه الغاية، تم تطوير نظام من المعادلات التفاضلية العادية غير الخطية لدراسة معاملات التحسين. يمكن تحسين كفاءة المجمّع إلى ما يقرب من 67% عند درجة حرارة مياه الإمداد القريبة من درجة الحرارة المحيطة. يمكن أن تصل إلى 68% للمسافات الصغيرة بين الزجاج والصفحة الماصة. ويمكن أيضاً تعظيمها من خلال حساب متوسط الزوايا المثلى على مدار عام أو موسم أو شهر أو فترة محددة. علاوة على ذلك، فإن اعتماد طلاء انتقائي يحسن الكفاءة إلى متوسط 2.58%.

الكلمات المفتاحية

سخان المياه بالطاقة الشمسية، إجمالي خسائر الحرارة، الطاقة الحرارية المفيدة، الطبقة الانتقائية، الاتجاه، الميل الأمثل، الكفاءة.

Table des Matières

Table des matières.....	01
Nomenclature.....	04
Table des figures.....	08
Liste des tableaux.....	11
Introduction générale.....	12

Chapitre 1 Les chauffe-eaux solaires

1.1. Introduction.....	14
1.2. Types et variantes des chauffe-eaux solaires.....	14
1.2.1. Capteurs plans à eau.....	15
1.2.1.1. Capteurs plans non-vitrés.....	15
1.2.1.2. Capteurs plans vitrés.....	16
1.2.2. Capteurs solaires à tubes sous vide.....	18
1.3. Types d'installations.....	20
1.3.1. Moquette solaire.....	20
1.3.2. Circulation par thermosiphon.....	21
1.3.3. Système à circulation forcée.....	23
1.4. Échanges thermiques dans un capteur solaire plan à eau.....	24
1.5. Rendement d'un capteur solaire.....	25
1.6. Conclusion.....	27

Chapitre 2 Adaptation d'une installation solaire

2.1. Introduction.....	29
2.2. La région de Ghardaïa.....	29
2.3. Rayonnement solaire.....	30

2.3.1. Coordonnées solaires.....	31
2.3.1.1. La latitude de lieu.....	31
2.3.1.2. La longitude de lieu.....	31
2.3.1.3. L'angle de déclinaison.....	31
2.3.1.4. L'angle horaire.....	31
2.3.1.5. Hauteur du soleil.....	32
2.3.1.6. Azimut du soleil.....	32
2.3.2. Orientation d'un plan.....	33
2.3.3. Angle d'incidence sur un plan.....	34
2.3.4. Angle d'inclinaison des capteurs solaires.....	34
2.3.5. L'inclinaison optimale.....	34
2.3.6. Modèle de Capderou & Cas d'un ciel clair.....	35
2.3.6.1. Éclairement solaire sur un plan horizontal.....	35
2.3.6.2. Éclairement solaire sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque	36
2.3.6.2.1. L'éclairement direct.....	36
2.3.6.2.2. L'éclairement solaire diffus.....	36
2.4. Comment et pourquoi orienter et incliner un capteur solaire ?	38
2.5. Calculs et validation des approches retenues.....	38
2.6. Le choix de l'inclinaison optimale.....	40
2.7. Conclusion.....	44

Chapitre 3

Application à un capteur solaire plan à eau

3.1. Introduction.....	46
3.2. Éléments principaux d'un capteur solaire plan à eau.....	47
3.2.1. Boîtier.....	47
3.2.2. Couvercle transparent.....	47
3.2.3. Absorbeur.....	48
3.2.4. La lame d'air.....	50

3.2.5. L'isolation.....	50
3.3. Bilan énergétique d'un capteur solaire plan à eau en régime dynamique.....	52
3.3.1. Bilan thermique du vitrage.....	53
3.3.2. Bilan thermique de l'absorbeur.....	55
3.3.3. Bilan thermique du fluide caloporteur.....	57
3.4. Rendement.....	57
3.5. Simulation numérique et résultats obtenus.....	60
3.5.1. Fiche technique du capteur plan.....	60
3.5.2. Description succincte de la région de Ghardaïa (d'étude).....	62
3.5.3. Résultats.....	63
3.5.3.1. Influence de la température de l'eau froide à l'entrée du capteur solaire	63
3.5.3.2. Influence de la distance entre la vitre et l'absorbeur.....	66
3.5.3.3. Influence de l'inclinaison.....	69
3.5.3.4. Influence de l'orientation.....	72
3.5.3.5. Influence de la couche sélective.....	75
3.7. Conclusion.....	78
Conclusion générale.....	79
Références bibliographiques.....	80

Nomenclature

T_m	Température moyenne du capteur ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ext}	Température de l'air à l'extérieur du capteur ($^{\circ}\text{C}$)
\dot{m}	Débit massique (kg/s)
C_p	Chaleur spécifique (J/kg K)
T_s	Température du fluide sortant du collecteur ($^{\circ}\text{C}$)
T_e	Températures du fluide entrant dans le collecteur ($^{\circ}\text{C}$)
N	Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier
TSV	Temps solaire vrai, temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence (h)
d	L'angle de déclinaison ($^{\circ}$)
H	L'angle horaire égale à 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai
DE	Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich, égale 1 h pour l'Algérie, (h)
TL	Temps légal, celui donné par une montre (h)
Et	Correction de l'équation du temps
h	Hauteur du soleil, l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal ($^{\circ}$)
a	L'angle d'azimut solaire, l'angle entre la projection des rayons du soleil et une ligne plein sud ou plein nord ($^{\circ}$)
i	L'angle d'incidence ($^{\circ}$)
β_{opt}	L'inclinaison optimale ($^{\circ}$)
T_L^*	Le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair
T_0	Le facteur de turbidité due à l'absorption gazeuse par la vapeur d'eau
z	L'altitude de lieu (km)
T_1	Le facteur de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh.
T_2	Le facteur de trouble dû à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption.
I_{hor}	Éclairement solaire sur un plan horizontal (W/m^2)
I_0	La constante solaire, sa valeur retenue est de 1367 W/m^2
D_{hor}	L'éclairement diffus observé sur une surface horizontale (W/m^2)

I_{inc}	L'éclairement direct sur un plan incliné (W/m^2)
I_{nor}	L'éclairement solaire direct à incidence normale (W/m^2)
δ_d	Rayonnement circumsolaire (W/m^2)
δ_i	La composante isotrope, correspond à un ciel de luminance uniforme (W/m^2)
δ_h	La composante du cercle de l'horizon (W/m^2)
d_{ciel}	L'éclairement diffus incident en provenance du ciel (W/m^2)
β	L'inclinaison du plan d'incidence ($^\circ$)
d_{sol}	L'éclairement diffus du sol (W/m^2)
ρ	L'albédo du sol (W/m^2)
$d_{rétr}$	L'éclairement diffus rétrodiffusé (W/m^2)
D_{inc}	L'éclairement solaire diffus incident sur un plan incliné (W/m^2)
$Er_{Abs Moy}$	L'erreur absolue moyenne
n	Le nombre de mesures
x	Le variable d'état
Er_{Rel}	L'erreur relative algébrique
$Er_{Rel Moy}$	L'erreur relative moyenne (non algébrique)
Ep	Épaisseur optimale de la lame d'air (m)
K	Conductivité du fluide caloporteur ($W/m K$)
T_U	Température d'utilisation ($^\circ C$)
Te	Température du réseau d'alimentation ($^\circ C$).
V	Le vitrage, c'est-à-dire le couvercle transparent
M	La masse (kg)
C_p	La chaleur spécifique (ou capacité thermique massique), définie par la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse du corps ($J kg^{-1} K^{-1}$).
T	La température (K)
t	Le temps (s)
α	Coefficient d'absorption solaire
$G_{Solaire}$	Densité du flux solaire ($W m^{-2}$)
S	La surface (m^2)
Ext	L'air ambiant extérieur

Ciel	Voûte circonscrite par l'horizon (la voûte du ciel)
Abs	Plaque absorbante (absorbeur)
V_{Vent}	La vitesse du vent (m/s)
T_{Amb}	La température du milieu ambiant extérieur (K)
ε	Coefficient d'émissivité
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
Nu	Nombre de Nusselt
k_{air}	Conductivité thermique de l'air (0.024 W/Km)
b	Distance entre l'absorbeur et le couvercle transparent (m)
Gr	Nombre de Grashof
Pr	Nombre de Prandtl
β	L'angle d'inclinaison ($^{\circ}$)
g	L'accélération de la pesanteur (m s^{-2})
Delta	Le coefficient de dilatation (K^{-1}), estimé approximativement à $1/T$
ΔT	La différence de température entre la paroi et l'air au repos (K)
L_c	La longueur caractéristique (m)
ρ	La masse volumique du fluide (kg s^{-3})
μ	La viscosité dynamique du fluide ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou Pa s)
ν	La viscosité cinématique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Ω	Le coefficient de Darcy
d_i	Diamètre intérieur du tube (m)
l	Longueur du tube (m)
μ	Viscosité dynamique de l'eau (Pa s)
V	Vitesse moyenne du fluide (m/s).
$e_{\text{Isolant arrière}}$	Épaisseur de l'isolation arrière (m)
$k_{\text{Isolant arrière}}$	Conductivité thermique de l'isolant (W/Km)
Q_u	La puissance utile (W)
w	Distance entre les tubes (m)
de	Diamètre extérieur du tube (m)
di	Diamètre intérieur du tube (m)
es	Épaisseur de la soudure (m)

b_s	Largeur de la soudure (m)
λ_s	Conductivité thermique de la soudure (W/K m)
λ_{Abs}	Conductivité thermique du tube et de la plaque absorbante (W/K m)
e_{Abs}	Épaisseur du tube et de la plaque absorbante (m)
R_1	Résistance thermique équivalente entre le milieu extérieur et le couvercle transparent ($m^2 K / W$)
R_2	Résistance thermique équivalente entre le couvercle et l'absorbeur ($m^2 K / W$)
R_3	Résistance thermique équivalente entre l'absorbeur et l'isolant ($m^2 K / W$)
R_4	Résistance thermique équivalente entre l'isolant et le milieu ambiant sous le capteur ($m^2 K / W$)

Liste des figures

- Figure 1.1 :** Types de capteurs solaires
- Figure 1.2 :** Chauffage des piscines par un capteur solaire plan non vitré [2]
- Figure 1.3 :** Capteur solaire plan non vitré souple [3]
- Figure 1.4 :** Capteur solaire plan à eau de type Sunrain FPC1200D
- Figure 1.5 :** Schéma descriptif d'un capteur solaire à eau à tubes sous vide [8]
- Figure 1.6 :** Schéma descriptif d'un capteur solaire à eau à tubes sous vide à écoulement direct [8]
- Figure 1.7 :** Implantation d'un capteur solaire de type moquette [8]
- Figure 1.8 :** Principe de la circulation par thermosiphon [2]
- Figure 1.9 :** Capteur solaire de type : (a) échelle ; le débit du fluide est réparti dans plusieurs tubes droits, sans coude, (b) à serpentin ; le débit passe tout dans le même tube, long et constitué de nombreux coudes [2]
- Figure 1.10 :** Système solaire à eau à circulation forcée [14]
- Figure 1.11 :** Échanges thermiques dans un capteur solaire plan à eau [15]
- Figure 1.12 :** Rendement d'un capteur solaire plan à eau conformément à la Norme P50-501 [15]
- Figure 1.13 :** Rendement d'un capteur solaire conformément à la Norme EN 12975-2 [15]
- Figure 2.1 :** La carte topographique d'Algérie [21]
- Figure 2.2 :** Rayonnement solaire reçu sur la terre [21]
- Figure 2.3 :** Schéma descriptif du repère horizontal [23]
- Figure 2.4 :** Identification de l'orientation et de l'inclinaison d'un capteur solaire plan : a- Capteur en exposition extérieure, b- Orientation (point cardinal face au capteur), c- Inclinaison (angle par rapport à l'horizontale)
- Figure 2.5 :** Identification éclaircissement solaire incident sur une surface horizontale, cas de la journée du 06 Janvier à Ghardaïa
- Figure 2.6 :** Identification éclaircissement solaire incident sur une surface horizontale, cas de la journée du 10 Juin à Ghardaïa

- Figure 2.7 :** Éclairement solaire incident sur une surface inclinée optimale correspondant aux jours type, cas de la région de Ghardaïa.
- Figure 3.1 :** Éléments constitutifs d'un capteur solaire plan à eau vitré
- Figure 3.2 :** Clipsage et brasage des tubes sous la plaque absorbante
- Figure 3.3 :** Capteur solaire plan de type "échelle", cas d'un montage hydraulique des tubes de type Tickelman
- Figure 3.4 :** Échanges thermiques dans un capteur solaire plan vitré à eau [15]
- Figure 3.5 :** Schéma d'analogie électrique du capteur plan à eau [23]
- Figure 3.6 :** Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.7 :** Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau) , 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.8 :** Coefficient de pertes global, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.9 :** Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$
- Figure 3.10 :** Rendement (l'efficacité) du capteur, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.11 :** Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.12 :** Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.13 :** Coefficient de pertes global, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.14:** Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.15 :** Rendement (l'efficacité) du capteur, cas de l'orientation sud, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.
- Figure 3.16 :** Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C

- Figure 3.17 :** Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C
- Figure 3.18 :** Coefficient de pertes global, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C
- Figure 3.19 :** Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C
- Figure 3.20 :** Rendement (l'efficacité) du capteur, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C
- Figure 3.21 :** Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.22 :** Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.23 :** Coefficient de pertes global, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.24 :** Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.25 :** Rendement (l'efficacité) du capteur, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.26 :** Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.27 :** Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.28 :** Coefficient de pertes global, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.29 :** Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.
- Figure 3.30 :** Rendement (l'efficacité) du capteur, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{\text{Eau-Entrée}} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

Liste des tableaux

- Tableau 2.1 :** Les valeurs de l'azimut du plan en fonction des différentes directions
- Tableau 2.2 :** Inclinaisons optimales des journées type
- Tableau 2.3 :** Irradiations solaires calculées (par kWh/m²) incidentes sur un capteur un plan d'inclinaison optimale, orienté au sud
- Tableau 3.1 :** Comparaison des propriétés des vitres [34]
- Tableau 3.2 :** Les revêtements sélectifs les plus courants [35]
- Tableau 3.3 :** Propriétés des isolants thermiques.
- Tableau 3.4 :** Propriétés Fiche technique du capteur solaire plan à eau
- Tableau 3.5 :** Approches utilisées pour déterminer les propriétés thermo-physiques (T en °C) [23]

Introduction générale

Beaucoup de populations, notamment dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, sont confrontées à de grands problèmes pour satisfaire leurs besoins en énergie. L'énergie solaire thermique de par ses avantages peut donc apporter dans plusieurs situations de réelles solutions. L'énergie solaire est la source de toute l'énergie sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, géothermique et marémotrice. L'utilisation des capteurs solaires pour produire de l'eau chaude sanitaire est une solution efficace. Cependant, des applications plus larges sont de plus en plus envisagées, notamment les systèmes solaires combinés fournissant de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Ces systèmes combinés sont plus complexes, nécessitent plus d'attention lors de la phase de conception et nécessitent des systèmes de contrôle automatique adéquats pour atteindre les performances requises pendant le fonctionnement.

Pour le chauffage résidentiel, on peut installer un chauffe-eau solaire ou un système de chauffage solaire. Dans ce travail, nous étudions l'utilisation de l'énergie solaire dans les capteurs solaires plans en vue de produire de l'eau chaude. L'objectif est de simuler un capteur solaire plan à eau appliqué au site de Ghardaïa. Le programme nous permet de faire un diagnostic adéquat des paramètres d'optimisation.

A cet effet, un système d'équations différentielles ordinaires non-linéaires régissant le comportement thermique du capteur qui englobent les différents coefficients d'échange thermique a été développé. Les simulations mathématiques ont produit des représentations graphiques des résultats, qui ont ensuite été analysées et discutées. Ce mémoire étudie principalement l'effet des paramètres d'optimisation. Pour ce faire, le travail est divisé en trois chapitres :

Le premier est consacré à un aperçu général sur les chauffe-eaux solaires en apportant des précisions sur ses composants, son principe de fonctionnement, leurs modes d'utilisation et ses différents types d'installation.

Le choix judicieux de l'orientation et de l'inclinaison optimale du capteur solaire plan à eau a été traité de manière minutieuse dans le second chapitre pour garantir une production maximale.

L'objectif du troisième chapitre est, premièrement, de proposer un modèle mathématique qui englobe l'ensemble des techniques à envisager, puis mettre en évidence l'effet des conditions météorologiques et l'influence des paramètres de fonctionnement.

Chapitre 1

Les chauffe - eaux solaires

Chapitre 1 : Les chauffe-eaux solaires

1.1. Introduction

Les chauffe-eaux solaires, parfois appelés systèmes solaires de production d'eau chaude domestique, constituent un moyen économique de la production d'eau chaude. En moyenne, un système de chauffe-eau solaire bien conçu et correctement installé permet aux propriétaires d'économiser entre 50 % et 80 % sur leurs coûts de chauffage de l'eau. Dans de nombreux cas, les économies réalisées peuvent même couvrir l'investissement initial dans le chauffe-eau solaire en l'espace de quelques années, ce qui se traduit par des avantages financiers à long terme.

Les chauffe-eaux solaires sont généralement plus efficaces sur le plan énergétique et plus respectueux de l'environnement, mais leur coût initial et les conditions d'installation peuvent être plus élevés. En termes de rentabilité, les chauffe-eau solaires commerciaux sont meilleurs que tous les autres types de chauffe-eau fonctionnant avec des énergies fossiles comme l'électricité du réseau conventionnel, le gaz ou d'autres combustibles.

L'objectif de ce premier chapitre est de donner un aperçu général sur les chauffe - eaux solaires en apportant quelques explications sur ses composants, son principe de fonctionnement, leurs modes d'utilisation et ses différents types d'installation.

1.2. Types et variantes des chauffe-eaux solaires

Ces dispositifs chauffent l'eau pour les éviers de cuisine, les douches des salles de bains et tout autre endroit où l'on souhaite de l'eau chaude. Les utilisations domestiques typiques de l'eau chaude sont donc la cuisine, le nettoyage, le bain et le chauffage des locaux. Lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant pour chauffer entièrement l'eau, un appoint au gaz ou à l'électricité intervient en renfort. Les chauffe-eaux solaires chauffent uniquement l'eau et ne produisent pas d'électricité.

Les principaux composants d'une installation solaire thermique sont les capteurs solaires, le fluide caloporteur, un échangeur de chaleur, un réservoir de stockage de la chaleur ainsi que les tuyaux et la technologie de contrôle (régulateur solaire, sonde de température, pompe de circulation...).

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captage de l'énergie solaire destiné à couvrir partiellement ou totalement la consommation d'eau chaude sanitaire. Les capteurs solaires pour le chauffage de l'eau sont constitués de tubes métalliques fixés à l'absorbeur. Un fluide

caloporteur est pompé dans les tubes de l'absorbeur pour en extraire la chaleur et la transférer à l'eau d'un réservoir de stockage.

Les capteurs solaires à eau peuvent avoir plusieurs variantes (figure 1.1). Les types les plus courants pour une utilisation sont deux : les collecteurs non concentrés et les collecteurs concentrés. Il existe également deux types de chauffe-eau solaires non concentrés : les chauffe-eau à plaques et les chauffe-eau à tubes sous vide.

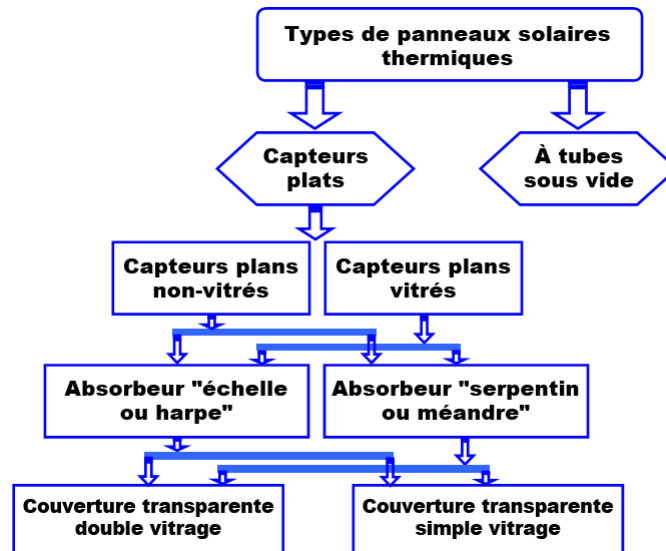


Figure 1. 1 : Types de capteurs solaires

1.2.1. Capteurs plans à eau

Un capteur plan est un dispositif agissant comme un échangeur de chaleur. Il convertit l'énergie solaire en énergie thermique. Il peut recueillir l'énergie solaire et l'utiliser pour chauffer l'eau de la maison pour le bain, le lavage, etc. Il peut également être utilisé pour chauffer les jacuzzis et les piscines. Ce type est mieux adaptée aux applications de chauffage des locaux ou au séchage des récoltes. Un ventilateur est généralement nécessaire pour faciliter la circulation de l'air dans le système et le transport efficace de la chaleur. Les liquides à changement de phase peuvent également être utilisés avec les capteurs plans.

1.2.1.1. Capteurs plans non-vitrés

Les capteurs plans non vitrés sont moins efficaces et conviennent à des applications à basse température, telles que le chauffage des piscines comme le montre la figure 1.2 ou le préchauffage de l'eau. Ils ne sont donc pas recommandés pour des applications industrielles [1].

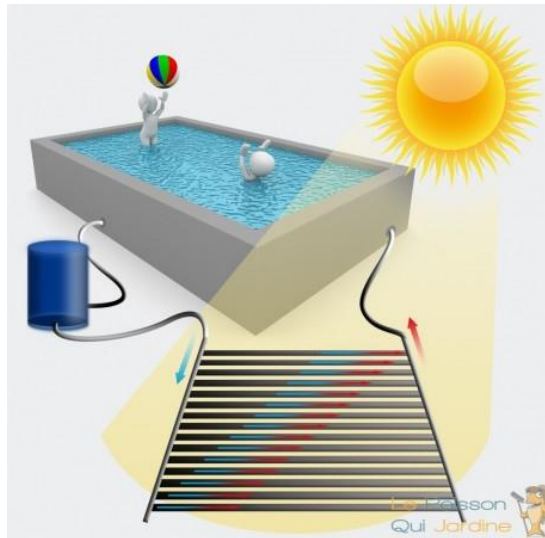


Figure 1. 2 : Chauffage des piscines par un capteur solaire plan non vitré [2]

Cependant, les capteurs plans non vitrés présentent également certains avantages. Ils sont moins chers, plus légers et plus durables que les capteurs vitrés. Les capteurs solaires non vitrés sont généralement fabriqués en plastique noir, stabilisé pour résister aux rayons ultraviolets. L'absorbeur est généralement en polypropylène, en caoutchouc ou en caoutchouc silicone (figure 1.3). Il peut fonctionner très bien lorsque la température de sortie souhaitée est proche de la température ambiante (c'est-à-dire lorsqu'il fait chaud à l'extérieur). Comme ces capteurs n'ont pas de vitrage, une grande partie du rayonnement solaire est absorbée [2]. C'est tout simplement le capteur qui a les plus grosses déperditions thermiques.



Figure 1. 3 : Capteur solaire plan non vitré souple [3]

1.2.1.2. Capteurs plans vitrés

Un capteur plan est un type de capteur solaire thermique constitué d'une plaque métallique plate recouverte d'un revêtement sombre qui absorbe le rayonnement solaire. La plaque est fixée à

un réseau de tuyaux qui transportent un fluide, généralement de l'eau ou de l'antigel, qui transfère la chaleur de la plaque vers un réservoir de stockage ou un échangeur de chaleur.

Comme le montre la figure 1.4, contrairement aux panneaux solaires traditionnels non vitrés, ces capteurs à haute performance contiennent des tuyaux en cuivre fusionnés à une ailette en aluminium hautement sélective dotée d'un revêtement absorbant spécial. Le tout est entouré d'un panneau de verre borosilicaté qui agit comme un thermos en empêchant l'énergie thermique d'être libérée dans l'environnement. Cela permet également d'éviter les pertes de chaleur dues au vent, un problème courant avec les autres capteurs [4-7].

Le type de verre utilisé dans les capteurs plans est presque toujours du verre trempé à faible teneur en fer. Comme il est trempé, le verre peut résister à une forte grêle sans se briser, ce qui est l'une des raisons pour lesquelles les capteurs plans sont considérés comme le type de capteur le plus durable. Des structures transparentes recouvrent l'absorbeur pour permettre la pénétration du soleil et limiter les pertes par convection et par rayonnement, et l'isolation thermique du boîtier du capteur réduit les pertes par conduction. En effet, l'efficacité de ces capteurs diminue à mesure que la température de l'absorbeur augmente en raison des pertes de chaleur plus importantes dans son environnement. L'utilisation de plusieurs couvercles en verre réduit ces pertes et, par conséquent, augmente l'efficacité thermique, mais limite la quantité de chaleur collectée. Ce type de capteurs est le plus couramment utilisé, probablement en raison de leur faible coût d'investissement et d'exploitation et de maintenance, de leur facilité de fabrication et du fait qu'ils ne nécessitent pas d'équipement de positionnement ou de suivi [4-7].

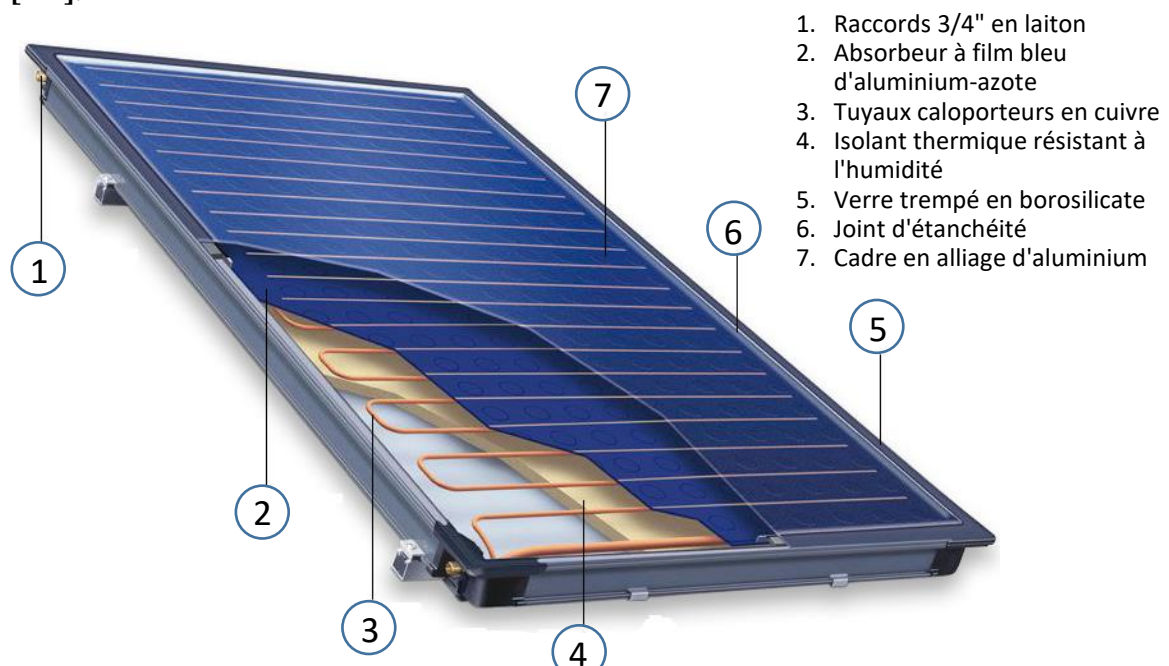


Figure 1. 4 : Capteur solaire plan à eau vitré de type Sunrain FPC1200D

1.2.2. Capteurs solaires à tubes sous vide

Le capteur à tubes sous vide se compose d'un certain nombre de tubes de verre scellés à l'intérieur desquels se trouve une tige ou un tuyau de cuivre thermo conducteur, ce qui permet d'obtenir une efficacité thermique et une température de fonctionnement beaucoup plus élevées que celles des capteurs solaires plans, même par temps très froid. Les capteurs plans ne peuvent fonctionner au maximum de leur efficacité que lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au plan du capteur. À d'autres moments, les rayons du soleil frappent le capteur à des angles différents et rebondissent sur le matériau du vitrage, ce qui réduit leur efficacité. Les systèmes de production d'eau chaude solaire qui utilisent des capteurs à tubes sous vide comme source de chaleur surmontent ce problème, car le capteur solaire utilise des tubes individuels arrondis qui sont toujours perpendiculaires aux rayons du soleil pendant la plus grande partie de la journée. Cela permet à un système de production d'eau chaude solaire utilisant un capteur à tubes sous vide de fonctionner à un rendement et à une température beaucoup plus élevée pendant une période beaucoup plus longue qu'un système conventionnel utilisant un seul capteur plan.

Le collecteur à tubes sous vide se compose de plusieurs rangées de tubes de verre transparents parallèles reliés à un tuyau collecteur et utilisés à la place de la plaque d'absorption de chaleur noircie que nous avons vue dans le capteur plan précédent. Ces tubes de verre sont de forme cylindrique. Par conséquent, l'angle de la lumière solaire est toujours perpendiculaire aux tubes absorbant la chaleur, ce qui permet à ces capteurs d'être performants même lorsque la lumière solaire est faible, par exemple tôt le matin ou tard l'après-midi, ou lorsqu'ils sont ombragés par des nuages. Les capteurs à tubes sous vide sont particulièrement utiles dans les régions où le temps est froid, nuageux et hivernal.

Comment fonctionnent les capteurs solaires à tubes sous vide ?

Selon la figure 1.5, les capteurs à tubes sous vide sont constitués d'une ou de plusieurs rangées de tubes de verre transparents parallèles reposant sur un cadre. Le diamètre de chaque tube varie de 25 mm à 75 mm et sa longueur de 1500 mm à 2400 mm, selon le fabricant. Chaque tube se compose d'un tube extérieur en verre épais et d'un tube intérieur en verre plus fin (appelé "tube à double vitrage") ou d'un "tube thermos" recouvert d'un revêtement spécial qui absorbe l'énergie solaire mais empêche la perte de chaleur. Les tubes sont fabriqués en verre borosilicaté ou en verre sodo-calcique, qui est solide, résistant aux températures élevées et qui présente une transmittance élevée pour l'irradiation solaire.

Contrairement aux capteurs plans, les capteurs à tubes sous vide ne chauffent pas l'eau directement à l'intérieur des tubes. Au lieu de cela, l'air est retiré ou évacué de l'espace entre les deux tubes, formant un vide (d'où le nom de tubes sous vide). Ce vide agit comme un isolant qui réduit considérablement les pertes de chaleur dans l'atmosphère environnante, que ce soit par convection ou par rayonnement, ce qui rend le capteur beaucoup plus efficace que l'isolation interne offerte par les capteurs plans. Grâce à ce vide, les capteurs à tubes sous vide produisent généralement des températures de fluide plus élevées que leurs homologues à plaques plates et peuvent donc devenir très chauds en été [8].

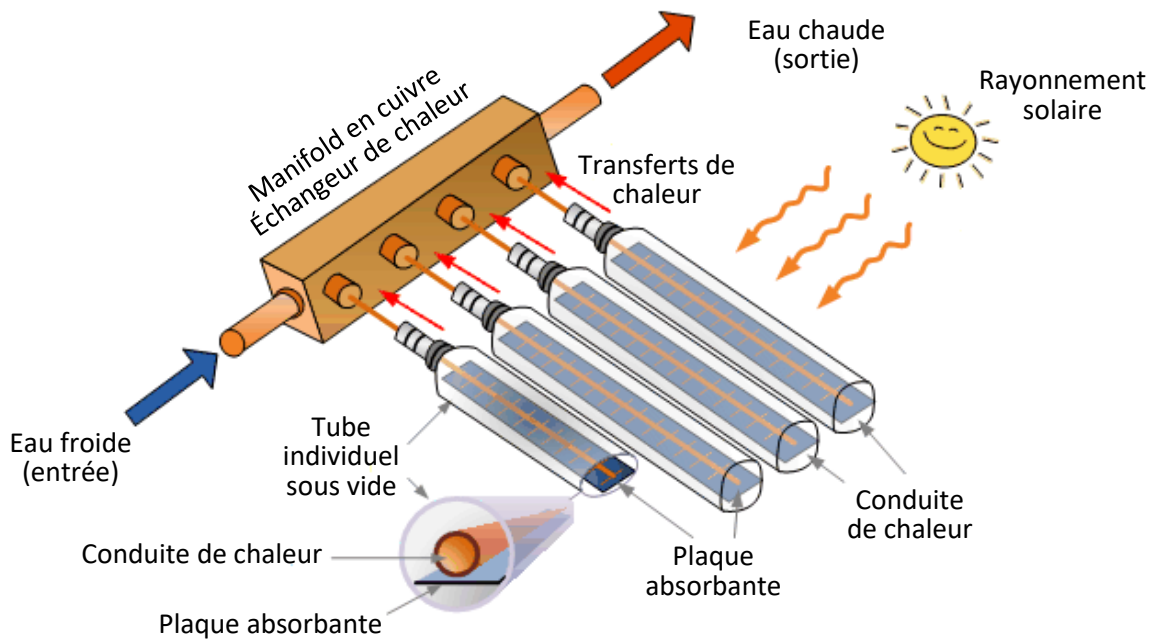


Figure 1. 5 : Schéma descriptif d'un capteur solaire à eau à tubes sous vide [9]

À l'intérieur de chaque tube de verre, une ailette plate ou incurvée en aluminium ou en cuivre est fixée à un caloduc métallique qui traverse le tube intérieur. L'ailette est recouverte d'un revêtement sélectif qui transfère la chaleur au fluide qui circule dans le tuyau. Ce caloduc en cuivre étanche transfère la chaleur solaire par convection de son fluide caloporteur interne à un "bulbe chaud" qui chauffe indirectement un collecteur en cuivre dans le réservoir collecteur. Ces tuyaux en cuivre sont tous reliés à un collecteur commun qui est ensuite relié à un réservoir de stockage, ce qui permet de chauffer l'eau chaude pendant la journée. L'eau chaude peut ensuite être utilisée la nuit ou le lendemain grâce aux propriétés isolantes du réservoir.

La figure 1.6 représente un schéma descriptif d'un collecteur à tubes sous vide à écoulement direct. Les collecteurs à tubes sous vide à écoulement direct, également connus sous le nom de collecteurs à tubes en "U", sont différents des précédents en ce sens qu'ils comportent deux caloducs traversant le centre du tube. L'un des tuyaux sert de tuyau d'écoulement, tandis que l'autre sert de tuyau de retour. Les deux tuyaux sont reliés au bas du

tube par un "coude en U", d'où leur nom [10]. De nombreux professionnels de l'industrie solaire estiment que les conceptions de tubes sous vide à écoulement direct sont plus efficaces sur le plan énergétique que les conceptions de caloducs, parce qu'avec l'écoulement direct, il n'y a pas d'échange de chaleur entre les fluides. De plus, à flux direct, les deux tubes thermiques sont placés l'un dans l'autre, de sorte que le fluide chauffé passe par le milieu du tube intérieur, puis remonte à travers le tube absorbeur extérieur.

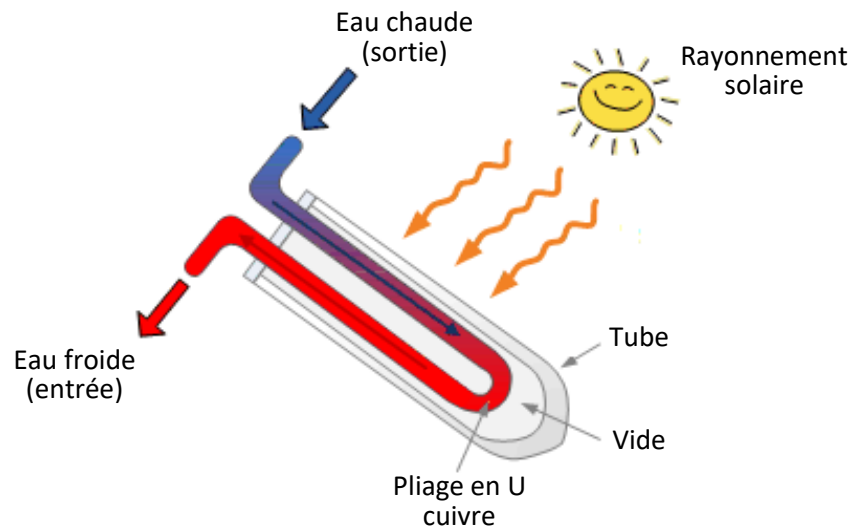


Figure 1. 6 : Schéma descriptif d'un capteur solaire à eau à tubes sous vide à écoulement direct [8]

Les tubes sous vide à flux direct peuvent capter le rayonnement direct et diffus et ne nécessitent pas de suivi solaire. Cependant, diverses formes de réflecteurs cylindro-paraboliques placés derrière les tubes sont parfois utilisées pour collecter utilement une partie de l'énergie solaire, qui pourrait autrement être perdue, fournissant ainsi une petite quantité de concentration solaire [11].

1.3. Types d'installations

1.3.1. Moquette solaire

Elle est représentée par la figure 1.7, c'est un tapis de couleur noire, posé à plat dans lequel circule l'eau à chauffer, à travers des tuyaux ou rainures. Cette installation est adaptée au réchauffage des piscines. Le chauffage solaire des piscines est très efficace et peut augmenter considérablement la température des piscines tout au long de l'année. Cela peut ajouter un certain nombre de mois de baignade à l'année et augmenter considérablement l'utilisation de ces piscines. Lorsque l'on compare les chauffages de piscine, il est important de savoir que si les chauffages au propane et les chauffages électriques offrent un investissement initial moins élevé, le coût du combustible nécessaire pour les faire fonctionner augmente rapidement, saison

après saison. Le propane est le type de système le plus cher, suivi du gaz naturel et de l'électricité, qui entraînent tous des frais de combustible.

Les chauffe-piscines solaires ne coûtent absolument rien, car l'énergie du soleil est gratuite. Et comme le système est entièrement automatique et ne comporte que peu de pièces mobiles, il ne nécessite pratiquement aucun entretien. Les chauffe-piscines solaires sont également 100 % écologiques. Il suffit de régler la température et de profiter d'une eau chaude pour une saison de baignade beaucoup plus longue sans se soucier de la facture d'énergie ou des dommages causés à l'environnement [12].



Figure 1. 7 : Implantation d'un capteur solaire de type moquette [8]

1.3.2. Circulation par thermosiphon

La circulation est le processus par lequel un système déplace des fluides de travail d'un point à un autre, dans l'ensemble d'un système. Nous utilisons les processus de circulation dans les applications de mécanique des fluides. Il existe deux méthodes principales pour faire circuler des fluides dans un système : la circulation naturelle et la circulation forcée. Le thermosiphon est une circulation naturelle.

Comme son nom l'indique, la circulation naturelle s'appuie sur le changement de densité des fluides lors de l'ajout de chaleur et sur les changements d'altitude pour faire circuler le fluide

de travail dans un système, tandis que les systèmes à circulation forcée utilisent des pompes électriques, des vannes ou des contrôleurs pour faire circuler les fluides. La cuve du stockage d'eau est placée en haut du capteur [13]. L'eau chaude, du fait de sa faible densité, a tendance à monter naturellement vers le réservoir de stockage comme l'indique la figure 1.8 [2].

Pour faciliter la circulation par thermosiphon, il est préférable d'utiliser un capteur solaire "échelle". Le capteur solaire à serpentin représenté par la figure 1.9, composé d'un seul drain et de nombreux coudes, a des pertes de charge trop élevées et oppose trop de résistance à la circulation du fluide par thermosiphon.

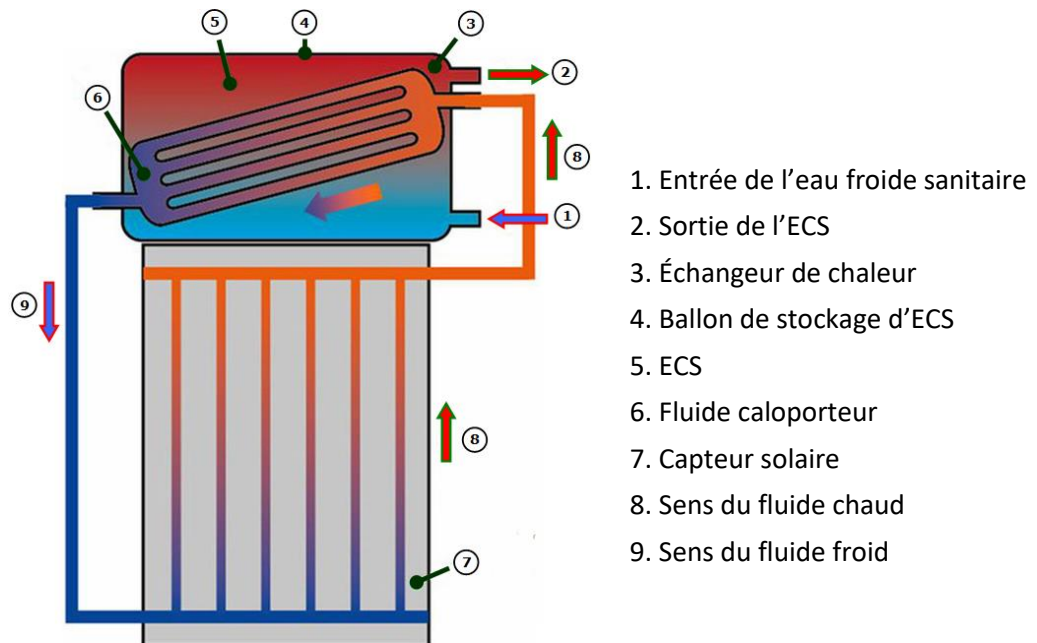


Figure 1. 8 : Principe de la circulation par thermosiphon [2]

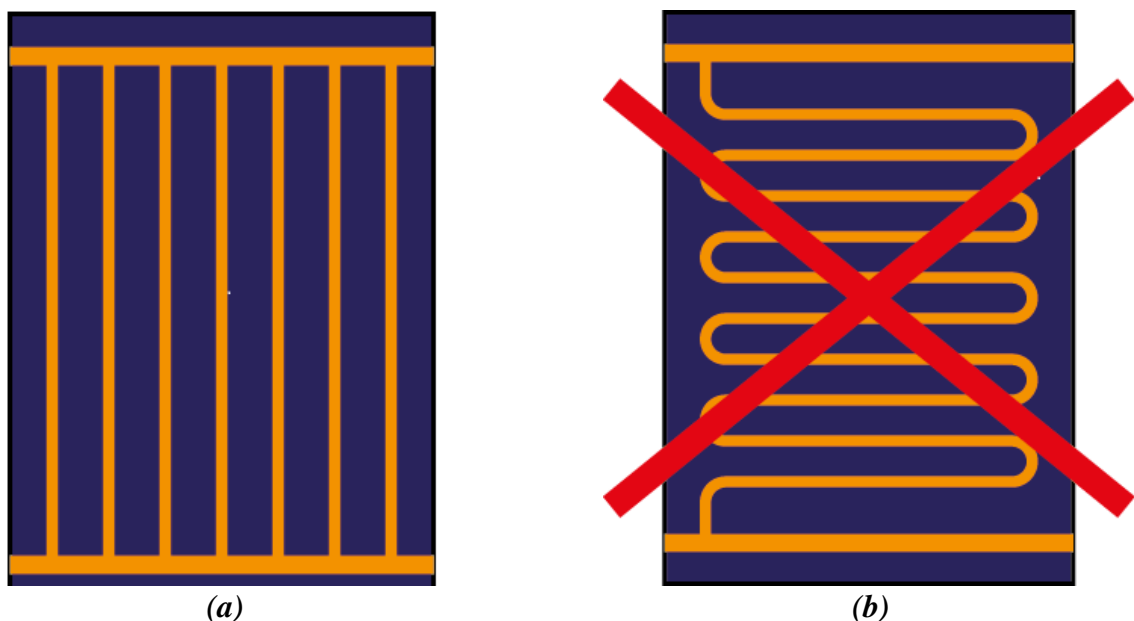


Figure 1. 9 : Capteur solaire de type : (a) échelle ; le débit du fluide est réparti dans plusieurs tubes droits, sans coude, (b) à serpentin ; le débit passe tout dans le même tube, long et constitué de nombreux coudes [2].

1.3.3. Système à circulation forcée

Ce système est plus complexe, mais offre une meilleure souplesse d'installation et facilite une intégration harmonieuse au bâtiment indiquée par la figure 1.10.

Il se compose tout d'abord d'un capteur solaire, un circuit d'eau doté d'une pompe, un réservoir pour stocker l'eau chaude, un régulateur thermique et un échangeur. Il est dit à circulation forcée parce que la circulation du fluide est assurée par un circulateur. Dans un chauffe-eau solaire à circulation forcée, l'eau est activement pompée du réservoir de stockage à travers les capteurs et retournée dans le réservoir. Un régulateur électronique, une petite pompe, des vannes et d'autres composants sont nécessaires au bon fonctionnement et à l'entretien. Avec un chauffe-eau à circulation forcée, le collecteur et le réservoir de stockage peuvent être installés séparément. Deux capteurs de température surveillent les températures du capteur solaire et du ballon de stockage. Si la température du capteur est supérieure à celle du réservoir dans une certaine mesure, la commande démarre la pompe qui déplace le fluide caloporteur dans le cycle solaire. Les différences de température à l'enclenchement se situent normalement entre 5 et 10 °C. Si la différence de température descend en dessous du deuxième seuil, la commande arrête à nouveau la pompe.

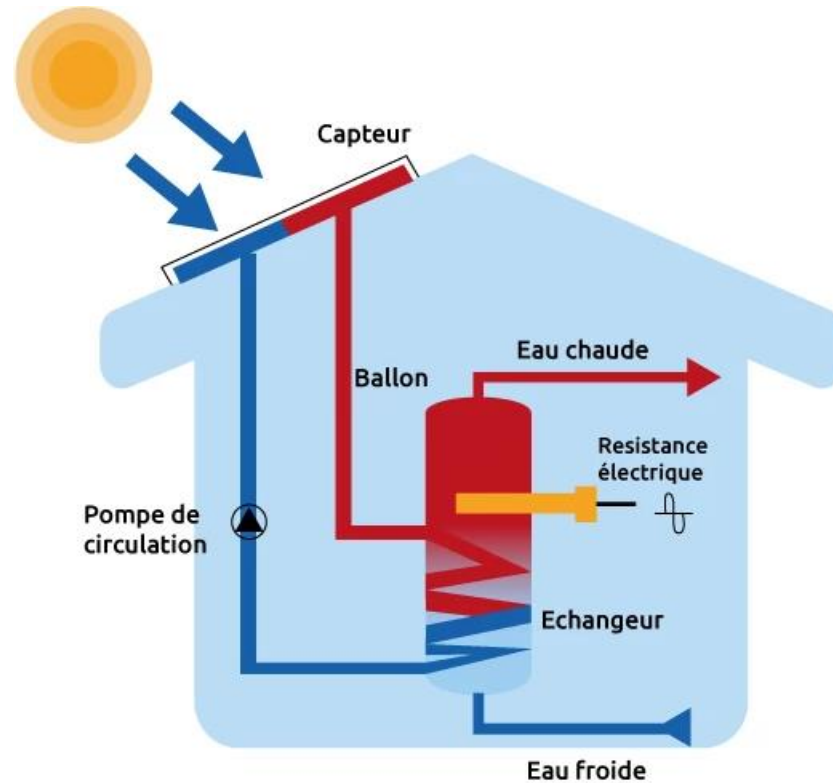


Figure 1. 10: Système solaire à eau à circulation forcée [14].

1.4. Échanges thermiques dans un capteur solaire plan à eau

Ces capteurs se composent d'une vitre transparente, d'un boîtier de capteur et d'un absorbeur. L'absorbeur, situé à l'intérieur du boîtier du capteur plan, convertit la lumière du soleil en chaleur et la transfère à l'eau dans les tubes de l'absorbeur.

Les matériaux qui les constituent doivent résister à la chaleur correspondante à la stagnation, c'est-à-dire au moment d'un équilibre thermique qui se présente lorsqu'il n'y aura pas un écoulement d'eau. C'est pourquoi l'absorbeur est généralement constitué de matériaux métalliques tels que le cuivre, l'acier ou l'aluminium. Le boîtier du capteur peut être en plastique, en métal ou en bois, et le couvercle avant en verre doit être scellé afin que la chaleur ne s'échappe pas et que la saleté, les insectes ou l'humidité ne pénètrent pas dans le capteur lui-même.

De nombreux collecteurs sont également équipés d'une ventilation contrôlée, afin d'éviter la condensation à l'intérieur du couvercle avant en verre. Le boîtier du capteur est fortement isolé à l'arrière et sur les côtés, ce qui réduit les pertes de chaleur. Toutefois, il subsiste des pertes de chaleur dans le capteur, principalement dues à la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant, qui se subdivisent en pertes par convection et par rayonnement. Les premières sont dues aux mouvements d'air, tandis que les secondes sont dues à l'échange de

chaleur par rayonnement entre l'absorbeur et l'environnement. Une feuille de verre recouvre le capteur face au soleil, ce qui permet d'éviter une partie des pertes par convection. En outre, elle réduit le rayonnement thermique de l'absorbeur vers l'environnement, comme le fait une serre. Cependant, le verre réfléchit également une petite partie de la lumière du soleil, qui n'atteint donc pas l'absorbeur. La figure 1.11 explique dans l'ensemble les phénomènes physiques et les échanges de chaleur qui s'interagissent dans un capteur plan.

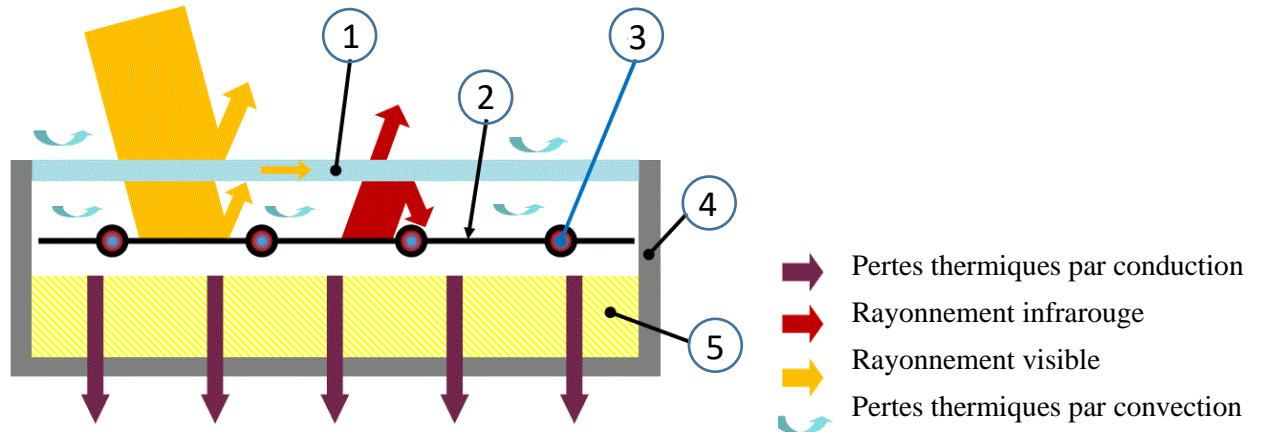


Figure 1. 11: Échanges thermiques dans un capteur solaire plan à eau [15].

1.5. Rendement d'un capteur solaire

Les principaux paramètres affectant les performances des capteurs solaires sont la surface, l'absorptivité et l'émissivité de l'absorbeur, l'émissivité de la couverture en verre, la température de la plaque de l'absorbeur, l'angle d'inclinaison du capteur et le nombre de couvertures en verre.

L'efficacité du capteur solaire indique la fraction de l'énergie solaire qui peut être transférée au fluide thermique dans le récepteur. Le rendement des capteurs solaires paraboliques varie beaucoup en fonction de la température du fluide. Eck et Steinmann (2005) ont indiqué que l'efficacité du capteur est plus élevée à basse température [16].

L'efficacité du capteur est définie comme étant le gain d'énergie utile du capteur par rapport au rayonnement solaire incident sur la surface d'ouverture qui est égale à la surface du capteur. Comme pour la production d'énergie utile du capteur solaire, le rendement peut être lié à la température moyenne de l'absorbeur et à la température moyenne du fluide ou à l'entrée du fluide [17] :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_C G_t} = \tau \alpha - U_L \frac{T_P - T_a}{G_t} \quad (1.1)$$

Q_u : puissance utile

α : coefficient d'absorption de l'absorbeur

τ : coefficient d'émissivité du vitrage

T_p : température de l'absorbeur (K)

T_a : température ambiante (K)

U_L : coefficient de pertes thermiques global ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

G_T : éclairement solaire incident sur le capteur du capteur (W/m^2)

A_C : surface du capteur (m^2)

Conformément à la norme française [18], le facteur optique ($\beta = \alpha \tau$) du capteur et le coefficient de transmission thermique du vitrage devront être pris en considération. Ce facteur est généralement donné par le fabricant. Il est par définition le rapport entre l'éclairement solaire incident sur le vitrage ou bien la surface d'ouverture et celui transformé en chaleur par l'absorbeur.

Le coefficient de transmission thermique k prend en considération les déperditions thermiques pour un 1 m^2 de la plaque absorbante. Les déperditions thermiques $D_{\text{dép}}$ sont proportionnelles à l'écart entre la température dans le capteur et la température extérieure.

$$D_{\text{dép}} = k (T_m - T_{\text{ext}}) \quad (1.2)$$

$$T_m = \frac{T_e - T_s}{2} \quad (1.3)$$

T_m : représente la température moyenne du capteur

T_{ext} : représente la température de l'air à l'extérieur du capteur

Conformément à la Norme NF P50-501, le rendement d'un capteur est donné par l'équation suivante :

$$\eta_{\text{Capteur}} = \frac{P_{\text{utile}}}{G_t} = \frac{\beta - k (T_m - T_{\text{ext}})}{G_t} \quad (1.4)$$

β : la transmission du capteur

k : coefficient de perte thermique ou de déperdition

Selon Roonprasang et al. [19-22], le rendement d'un capteur peut être exprimé par l'équation ci-dessous :

$$\eta_{\text{Capteur}} = \frac{P_{\text{utile}}}{G_t} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{G_t} \quad (1.5)$$

Où \dot{m} est le débit massique (kg/s),

C_p est la chaleur spécifique (J/kg K),

T_o et T_i sont les températures du fluide sortant et entrant dans le collecteur ($^\circ C$).

Les figures 1.12 et 1.13 montrent que le rendement d'un même capteur n'est pas une caractéristique stable. Il fluctue en fonction de deux grandeurs :

- L'écart entre la température moyenne du capteur et la température à l'extérieur du capteur
 - L'irradiance solaire, qui fluctue elle-même en fonction des conditions météorologiques
- Pour mieux comprendre cette évolution, on peut se reporter à la courbe du rendement ci-dessous.

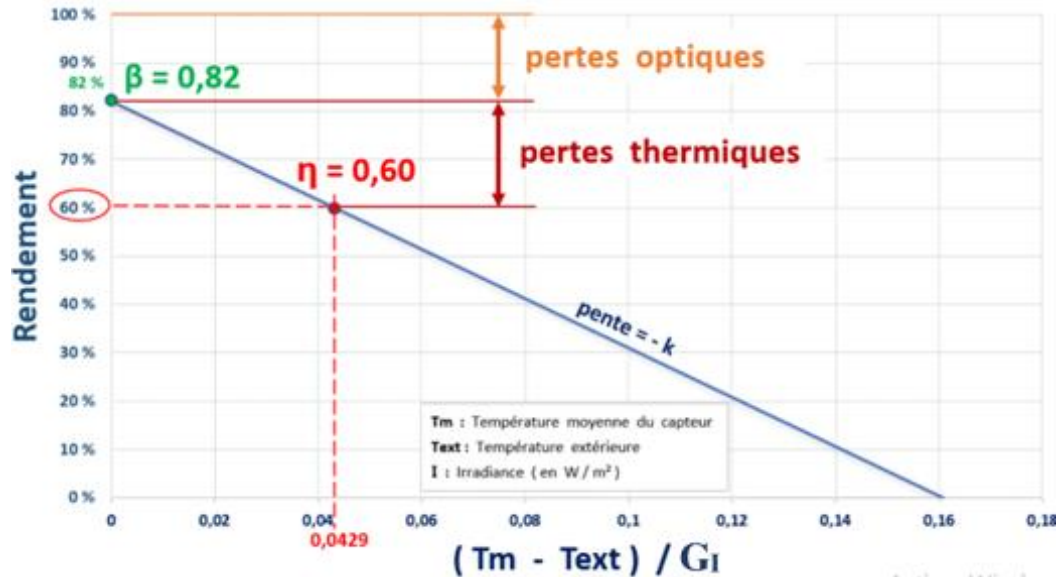


Figure 1.12: Rendement d'un capteur solaire plan à eau conformément à la Norme P50-501 [15]

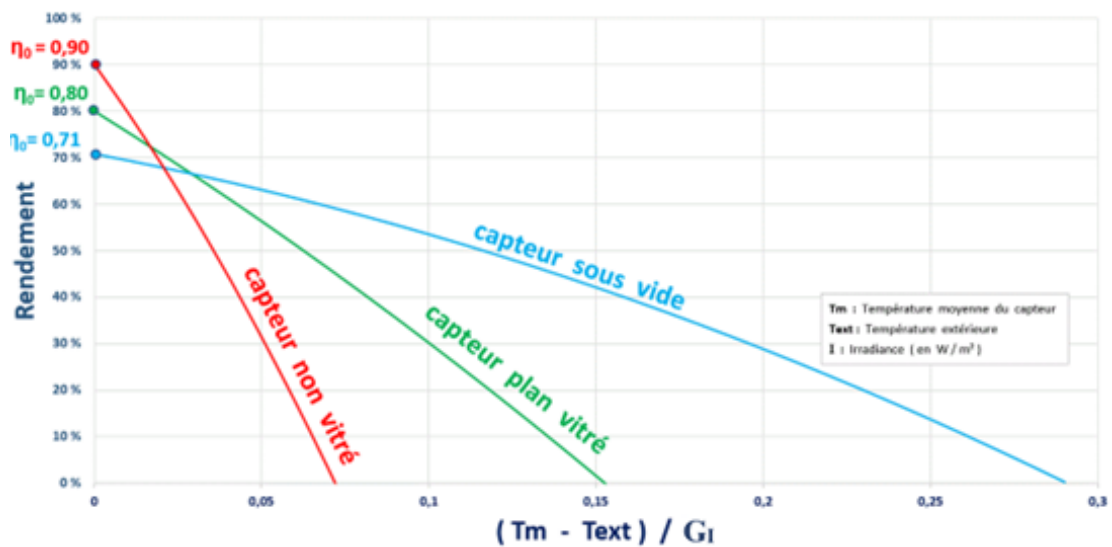


Figure 1.13: Rendement d'un capteur solaire conformément à la Norme EN 12975-2 [15]

1.6. Conclusion

Les capteurs plans sont les équipements les plus utilisés dans le domaine de l'énergie solaire. Afin d'obtenir les meilleurs résultats avec ces dispositifs, il est nécessaire de bien comprendre leur mécanisme.

La diminution du rendement des capteurs solaires est principalement dû à la perte par convection. Cette perte peut être réduite en plaçant l'absorbeur sous vide. Il n'est pas possible de faire le vide sur la surface d'un absorbeur dans un capteur plan ordinaire.

Pour en revenir à l'efficacité du collecteur, il a été constaté que lorsque la température du collecteur augmente, l'efficacité diminue, car les pertes de chaleur dans l'environnement augmentent. L'utilisation de plusieurs couvercles en verre améliore l'efficacité à haute température du collecteur, mais réduit la quantité de chaleur collectée.

Chapitre 2

Adaptation d'une installation solaire

Chapitre 2 : Adaptation d'une installation solaire

2.1. Introduction

L'orientation et l'inclinaison optimales des capteurs solaires sont essentielles pour maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie utilisable, qu'elle soit thermique ou électrique. Dans ce cas, trouver l'orientation et l'inclinaison optimales du capteur solaire est crucial pour garantir une production maximale d'énergie solaire. Dans cette section, nous examinons les facteurs qui influencent l'orientation et l'inclinaison optimales des capteurs solaires et les méthodes utilisées pour déterminer ces paramètres afin d'optimiser la production d'énergie solaire.

2.2. La région de Ghardaïa

Selon la figure 2.1, la région de Ghardaïa est une région située dans le nord du Sahara septentrional, caractérisé par un climat chaud et sec en été et froid en hiver. L'altitude de Ghardaïa est de 503m au-dessus du niveau de la mer, sa Latitude : $32^{\circ}29'27''$ Nord, et sa Longitude : $3^{\circ}40'24''$ Est.



Figure 2. 1 : La carte topographique d'Algérie [21]

La ville de Ghardaïa est à 600 km au sud de la capitale Alger. Sa superficie totale est estimée à $19\,729\text{ km}^2$. Elle est bordée par Laghouat et Djelfa au nord, au sud par Menia, à l'est par Ouargla et à l'ouest par El Bayadh. Le chef-lieu est à 200 km du chef-lieu de Laghouat, à 200 km du

chef-lieu d'Ouargla, à 270 km du chef-lieu de Ménia et à 432 km du chef-lieu d'El Bayadh. Elle est traversée par la route nationale n°1, reliant la capitale algérienne au Grand Sud.

2.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement est le transfert d'énergie par le biais d'ondes électromagnétiques. Le rayonnement se produit directement de la source vers l'extérieur dans toutes les directions. Ces rayonnements ne nécessitent pas de milieu pour voyager à travers l'espace interplanétaire jusqu'à la Terre depuis le Soleil, et ils ont l'avantage de se propager dans le vide. La longueur d'onde et la fréquence des ondes électromagnétiques sont des paramètres importants qui déterminent leur énergie, leur champ de vision et leur pénétration. Toutes les ondes électromagnétiques (rayonnement) se propagent dans le vide à une vitesse de 299 792 Km/s [20]. Le rayonnement solaire représente la quantité d'énergie reçue par unité de surface du sol. Ses unités communes sont J/m^2 , J/cm^2 , Wh/m^2 ou kWh/m^2 . Cela dépend de nombreux facteurs, notamment la nébulosité, la durée du jour, l'heure de la journée considérée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du site, les niveaux de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon. La combinaison de tous ces paramètres produit des variations spatiales et temporelles du rayonnement solaire. Dans les zones situées entre 40° de latitude nord et sud de la Terre, l'énergie totale reçue par le plan horizontal est comprise entre 1400 et 2500 kWh/m^2 par an [21]. La figure 2.2 donne un aperçu général sur le comportement du rayonnement solaire.

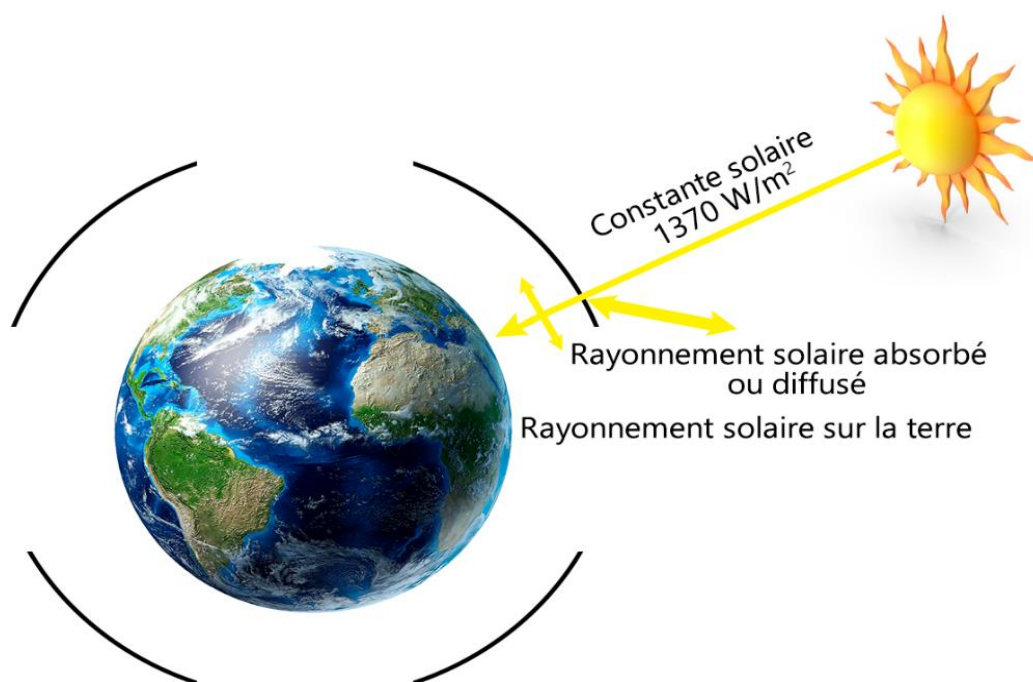


Figure 2. 2 : Rayonnement solaire reçu sur la terre [21].

2.3.1. Coordonnées solaires

Les coordonnées solaires varient toutefois d'un jour à l'autre, car la terre tourne sur son orbite autour du soleil. La position du soleil dans le ciel dépend à la fois de l'heure et de la position géographique de l'observation à la surface de la terre. Lorsque la terre tourne autour du soleil au cours d'une année, le soleil semble se déplacer par rapport aux étoiles fixes de la sphère céleste, le long d'une trajectoire circulaire appelée écliptique. La position du soleil par rapport à un observateur à la surface de la terre est une donnée importante nécessaire pour modéliser les performances d'un système solaire. Les angles solaires sont des facteurs extérieurs cruciaux à prendre en considération lors de l'installation d'un capteur solaire. Nous nous concentrerons donc sur les différents types d'angles solaires.

2.3.1.1. La latitude de lieu

La latitude φ est par définition l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré. Elle est quantifiée par degrés, de 0° à 90° de part et d'autre de l'équateur, ce qui donne la latitude Nord et la latitude Sud. L'équateur est la ligne de la latitude 0° [22].

2.3.1.2. La longitude de lieu

La longitude, dont le symbole est λ , est une autre coordonnée angulaire définissant la position d'un point à la surface de la terre. Elle représente l'angle formé par le plan méridien du lieu et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 0° [22].

2.3.1.3. L'angle de déclinaison

Cet angle varie selon les saisons en raison de l'inclinaison de la terre sur son axe de rotation et de la rotation de la terre autour du soleil. Si la terre n'était pas inclinée sur son axe de rotation, la déclinaison serait toujours de 0° . Sa valeur varie entre $-23^\circ 7'$ (au solstice d'hiver) et $+23^\circ 7'$ (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne [22].

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 82) + 2 \sin \left(\frac{360}{365} (N - 2) \right) \right] \right] \quad (2.1)$$

N : le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

2.3.1.4. L'angle horaire

L'angle horaire est un paramètre qui décrit la différence entre le temps solaire local et le midi solaire. Bien qu'il soit calculé directement à partir des mesures du temps, il est exprimé en unités angulaires (degrés). L'angle horaire mesure le temps après-midi solaire à raison d'un degré toutes les quatre minutes, soit quinze degrés par heure. Le temps d'après-midi solaire est

exprimé par un angle horaire positif, et le temps avant midi solaire par un angle horaire négatif. Par conséquent, deux heures avant midi solaire, l'angle horaire est de -30 degrés, et deux heures après midi solaire, il est de +30 degrés.

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (2.2)$$

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{Et + 4 \lambda}{60} \right) \quad (2.3)$$

$$Et = 9.87 \sin \left(\frac{720}{365} (N - 82) \right) - 7.53 \cos \left(\frac{360}{365} (N - 82) \right) - 1.5 \sin \left(\frac{360}{365} (N - 82) \right) \quad (2.4)$$

TSV : est par définition le temps solaire vrai, égale au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

La valeur de l'angle horaire H égale à 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai.

DE : représente le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 pour l'Algérie).

TL : le temps légal, celui donné par une montre.

Et : correction de l'équation du temps.

2.3.1.5. Hauteur du soleil

Comme il est indiqué dans la figure 2.3, c'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Le soleil culmine à 46.56° d'altitude en hiver et à 93.44° d'altitude en été. L'élévation du soleil au lever ou au coucher du soleil est toujours de 0°. L'élévation du soleil à midi sur l'équateur à l'équinoxe est de 90°.

$$\sin(h) = \cos(d) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(d) \quad (2.5)$$

2.3.1.6. Azimut du soleil

L'angle d'azimut solaire (a) est l'angle entre la projection des rayons du soleil et une ligne plein sud ou plein nord [23].

$$\sin(a) = \frac{\cos(d) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (2.6)$$

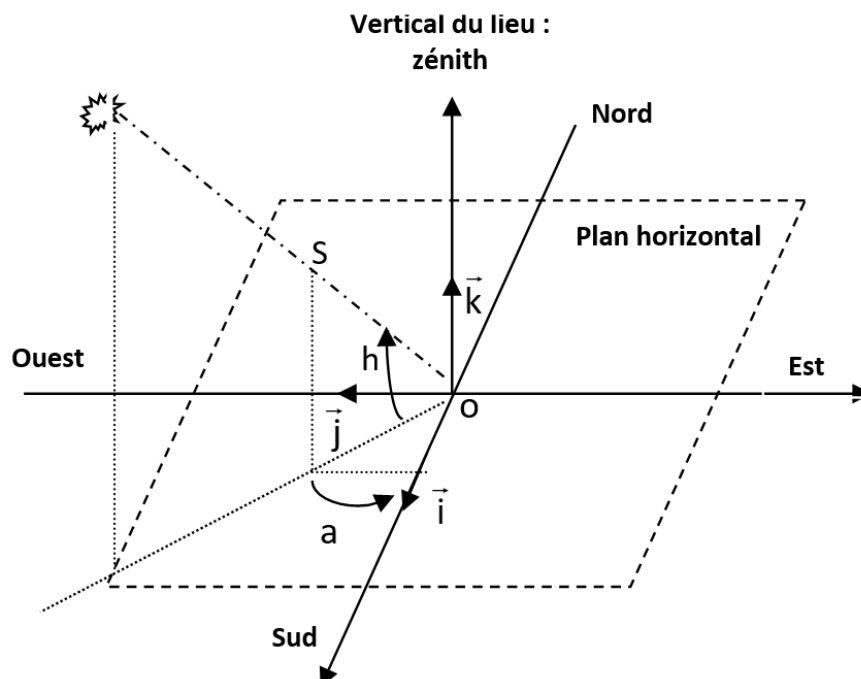


Figure 2. 3 : Schéma descriptif du repère horizontal [23]

2.3.2. Orientation d'un plan

En principe, les capteurs solaires peuvent être orientés dans toutes les directions. L'inclinaison du plan est définie comme l'angle entre le plan et l'horizontale. Les orientations les plus courantes sont le sud et l'est-ouest. Le soleil étant à son maximum au sud, il est logique de positionner les capteurs dans cette direction. Les chauffe-eaux solaires orientés vers le sud atteignent leurs valeurs maximales à la mi-journée.

Idéalement, un capteur solaire devrait être positionné perpendiculairement au rayonnement solaire pour obtenir un meilleur rendement, mais le soleil n'est pas fixe sur l'horizon, il se déplace visuellement tout au long de la journée. Dans la pratique, le capteur doit idéalement être dirigé plein sud pour les sites situés dans l'hémisphère nord et plein nord pour les sites situés dans l'hémisphère sud.

Dans l'hémisphère nord, l'azimut du plan est défini comme l'angle entre le sud et le plan du collecteur. Cet angle est considéré comme négatif vers l'est, c'est-à-dire qu'il va dans le sens anti-trigonométrique (voir le tableau 2.1).

Tableau 2. 1 : Les valeurs de l'azimut du plan en fonction des différentes directions.

Orientation	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest
Azimuth (°)	180	- 135	- 90	- 45	0	45	90	135
	- 180	225	270	315	360	- 315	- 270	- 225

2.3.3. Angle d'incidence sur un plan

En physique, l'angle d'incidence peut être représenté comme l'angle formé entre un rayon se propageant sur une surface et la ligne normale au point d'apparition sur la même surface.

Plus précisément, l'angle d'incidence, en optique géométrique, est l'angle entre un rayon incident sur une surface et la ligne perpendiculaire (à un angle de 90 degrés) à la surface au point d'incidence, appelée la normale. Le rayon peut être formé par n'importe quelle onde, comme les ondes optiques, acoustiques, micro-ondes et les rayons X. Pour les rayons solaires, il est donné par les équations suivantes [23] :

En se basant sur les coordonnées horizontales :

$$i = \text{acos}(\sin(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) - \sin(\gamma) \sin(h)) \quad (2.7)$$

En se basant sur les coordonnées horaires

$$\begin{aligned} i = & \text{acos}(\sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(H) \cos(d) \\ & + \cos(\alpha) \cos(\gamma) (\cos(H) \cos(d) \sin(\varphi) - \sin(d) \cos(\varphi)) \\ & + \sin(\gamma) (\cos(H) \cos(d) \cos(\varphi) - \sin(d) \sin(\varphi))) \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.3.4. Angle d'inclinaison des capteurs solaires

La position des capteurs thermiques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser de manière judicieuse. Comme nous l'avons vu, on appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du capteur plan (sud, nord, sud-ouest...) quant à l'inclinaison. Elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés.

2.3.5. L'inclinaison optimale

Afin de bénéficier de l'énergie solaire, qui est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes, avec la plus grande efficacité, différents paramètres doivent être optimisés. Une étude a mis l'accent sur l'optimisation de l'angle du panneau en utilisant les valeurs du rayonnement solaire incident sur le plan horizontal selon l'orientation sud [23].

Cependant, cette partie vise à fournir une énergie maximale d'origine solaire en déterminant les angles optimaux sur une base mensuelle, saisonnière et annuelle. Dans ce contexte, l'équation de l'angle d'inclinaison optimale est donnée par l'expression donnée ci-dessous [23] :

$$\beta_{\text{opt}} = \varphi - d \quad (2.9)$$

En plus de l'équation 2.1, une autre approche peut être proposée pour calculer la déclinaison du soleil.

$$d = 0.33 - 22.18 \cos(0.984 j) - 0.35 \cos(1.968 j) - 0.14 \cos(2.952 j) + 3.787 \sin(0.984 j) + 0.032 \sin(1.968 j) + 0.072 \sin(2.952 j) \quad (2.10)$$

2.3.6. Modèle de Capderou & Cas d'un ciel clair

En 1987, Capderou a proposé un modèle mathématique permettant de calculer le rayonnement direct et diffus incident sur un plan horizontal. Il s'est basé sur le calcul du facteur de trouble atmosphérique. Ce facteur de perturbation atmosphérique prend en compte et comprend le fond atmosphérique, la réfraction, la turbulence et la diffusion des aérosols.

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair peut être déterminé en utilisant l'équation suivante [24] :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2.11)$$

T_0 est le facteur de turbidité due à l'absorption gazeuse par la vapeur d'eau, qui est donné par l'expression :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 \left(2 + \sin(\varphi) \right) \sin \left(\frac{360}{365} (j - 121) \right) - 0.2 z - \left(1.22 + 0.14 \sin \left(\frac{360}{365} (j - 121) \right) \right) (1 - \sin(h)) \quad (2.12)$$

z représente l'altitude de lieu.

T_1 est le facteur de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh.

$$T_1 = 0.89^z \quad (2.13)$$

T_2 est le facteur de trouble dû à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption. Il en fonction, à la fois de la nature et de la quantité des aérosols. L'expression de ce facteur dépend du coefficient de trouble d'Angstrom β .

$$T_2 = \left(0.9 - 0.4 \sin \left(\frac{360}{365} (j - 121) \right) \right) 0.63^z \quad (2.14)$$

2.3.6.1. Éclairement solaire sur un plan horizontal

L'éclairement solaire direct sur un plan horizontal est calculé par l'équation ci-dessous [24] :

$$I_{hor} = I_0 \sin(h) C_{t-s} e^{-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h) \right)^{-1}} \quad (2.15)$$

I_0 est la constante solaire, sa valeur retenue est de 1367 W/m^2 . Mais vu que la distance terre-soleil est variable, la nouvelle ou la constante solaire corrigée retenue est définie par le produit multiplicatif $I_0 C_{t-s}$ avec :

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (2.16)$$

L'éclairement diffus observé sur une surface horizontale dépend de la valeur du facteur de turbidité de Linke et de l'angle d'élévation du soleil.

$$D_{\text{hor}} = I_0 C_{t-s} e^{-1+1.06 \log(\sin(h))} + 1.1 - \sqrt{1.21 + b^2} \quad (2.17)$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(h))^2 \quad (2.18)$$

L'éclairement solaire globale est par définition la somme de ses deux composants, le direct et le diffus :

$$G_{\text{hor}} = I_{\text{hor}} + D_{\text{hor}} \quad (2.19)$$

2.3.6.2. Eclairement solaire sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque

2.3.6.2.1. L'éclairement direct

Cet éclairement est la projection de la composante normale sur un plan incliné [24].

$$I_{\text{inc}} = I_{\text{nor}} \cos(i) = I_0 \cos(i) C_{t-s} e^{-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89 z^{1.4}} \sin(h)\right)^{-1}} \quad (2.20)$$

I_{nor} représente l'éclairement solaire direct à incidence normale.

2.3.6.2.2. L'éclairement solaire diffus

Il s'agit du rayonnement solaire qui atteint le sol et qui a été dispersé par un composant atmosphérique tel que les molécules d'air, la poussière ou les nuages. Il est composé de trois parties :

La composante circumsolaire

L'ampleur du rayonnement circumsolaire et sa distribution autour du disque solaire dépendent fortement des composantes atmosphériques, qui varient d'un endroit à l'autre et dans le temps [25]. Par conséquent, la détermination du rayonnement circumsolaire est très importante pour modéliser les systèmes solaires et éviter les erreurs dans l'estimation de leur production d'énergie. Elle peut être considérée qu'elle provient directement du soleil ou de son voisinage selon un cône de demi-angle d'un sommet compris entre 3° et 15° [24].

$$\delta_d = I_0 C_{t-s} e^{-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{aa^2 + 4 bb^2}} \quad (2.21)$$

$$aa = 3.1 - 0.4 bb \quad (2.22)$$

$$bb = \log(T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h)) \quad (2.23)$$

La composante isotrope

Elle correspond à un ciel de luminance uniforme, son expression est définie par l'équation suivante [24] :

$$\delta_i = D_{hor} - \delta_d \sin(h) \quad (2.24)$$

La composante du cercle de l'horizon

Cette composante provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques [24].

$$\delta_h = I_0 C_{t-s} \frac{-0.02 aaa}{aaa^2 + aaa bbb + 1.8} e^{\sin(h)} \quad (2.25)$$

$$aaa = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h)) \quad (2.26)$$

$$bbb = e^{0.2 + 1.75 \log(\sin(h))} \quad (2.27)$$

En effet, l'éclairement diffus incident en provenance du ciel est donné par la formule suivante [24] :

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(90 - \beta)}{2} + \delta_h \cos(90 - \beta) \quad (2.28)$$

β défini l'inclinaison du plan d'incidence

L'éclairement diffus du sol est en fonction de son albédo qui révèle la réflexion du flux solaire incident [24] :

$$d_{sol} = \rho G_{hor} \frac{1 - \sin(90 - \beta)}{2} \quad (2.29)$$

ρ représente l'albédo du sol

L'éclairement diffus rétrodiffusé est celui qui est rediffusé à nouveau par le ciel vers le sol. Selon Capderou, il s'exprime selon la forme suivante [24] :

$$d_{rétr} = 0.9 (\rho - 0.2) G_{hor} e^{-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}} \quad (2.30)$$

L'éclairement solaire diffus incident sur un plan incliné est donné par l'équation suivante [24] :

$$D_{inc} = d_{ciel} + d_{sol} + d_{rétr} \frac{1 + \sin(90 - \beta)}{2} \quad (2.31)$$

D'où l'éclairement solaire global incliné à un instant donné est le suivant [24] :

$$G_{inc} = I_{inc} + D_{inc} \quad (2.32)$$

2.4. Comment et pourquoi orienter et incliner un capteur solaire ?

Il a été prouvé qu'un capteur plan reçoit mieux les rayons du soleil si ces derniers arrivent perpendiculairement au plan formé. Les principales raisons sont dues à la réflexion qui est quasi nulle si le panneau est en face (en parallèle). En plus, comme l'indique la figure 2.4, la surface sur laquelle les rayons tapent, est réduite lorsque le capteur n'est pas perpendiculaire aux rayons du soleil.

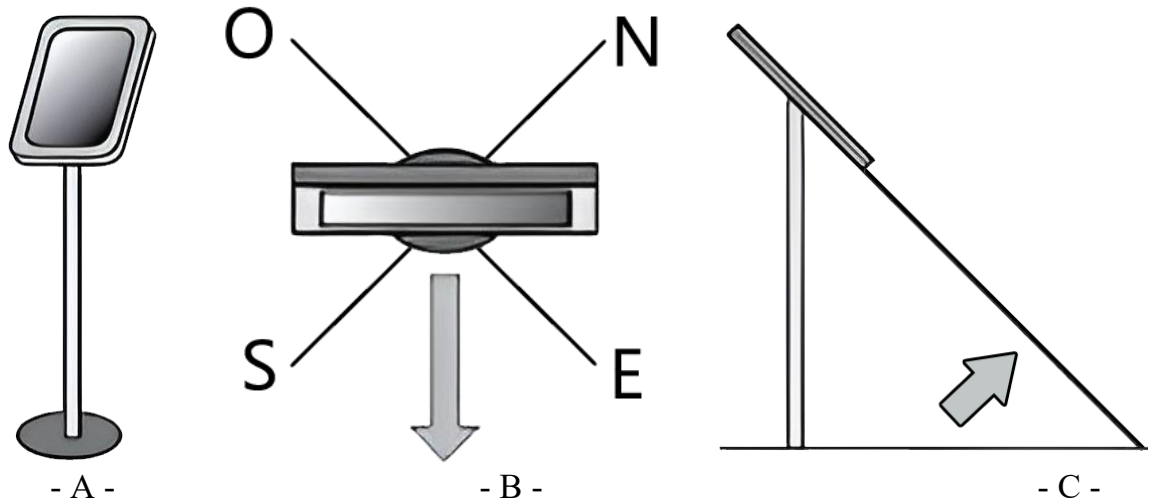


Figure 2. 4: Identification de l'orientation et de l'inclinaison d'un capteur solaire plan :
 A- Capteur en exposition extérieure, B- Orientation (point cardinal face au capteur),
 C- Inclinaison (angle par rapport à l'horizontale)

L'orientation idéale d'un capteur solaire obéit donc à une règle très simple à retenir. Les systèmes solaires devront être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord et vers le nord dans l'hémisphère sud.

2.5. Calculs et validation des approches retenues

Cette partie est consacrée à une étude comparative entre l'éclairement solaire calculé par l'approche de Capderou convenable à un ciel clair et les valeurs mesurées. Les résultats de ce modèle seront corroborés par les données expérimentales pour tester la précision de l'approche.

L'erreur absolue moyenne est la différence moyenne entre la valeur estimée, calculée ou déduite et la valeur réelle d'une quantité.

$$Er_{Abs Moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x| \quad (2.33)$$

n : le nombre de mesures, x : la variable d'état

Le rapport entre l'erreur absolue de l'estimation et la valeur réelle est appelé erreur relative algébrique. En calculant l'erreur relative algébrique, nous pouvons avoir une idée sur la qualité de l'estimation par rapport à la taille réelle, mais elle n'est pas crédible pour des faibles valeurs. À partir de l'erreur relative, nous pouvons déterminer l'ampleur de l'erreur absolue. L'erreur relative est sans dimension et n'a pas d'unité. Elle est exprimée en pourcentage en la multipliant par 100. Si l'erreur absolue de l'estimation est Δx , la valeur réelle est x_0 , la valeur calculée est x, l'erreur relative algébrique est exprimée comme suit :

$$Er_{Rel} = \frac{x_0 - x}{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} \quad (2.34)$$

L'erreur relative moyenne (non algébrique) peut être déduite par la formule suivante :

$$Er_{Rel Moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_0 - x}{x_0} \right| \quad (2.35)$$

La figure 2.5 indique une concordance très acceptable des courbes tracées. Elle correspond la journée du 06 Janvier. L'erreur absolue moyenne du lever au coucher du soleil est fixée à 3.30 W/m². Par ailleurs, l'erreur relative moyenne entre 10h et 16h est de 6.66%. Cependant, la journée du 10 Juin, caractérisée par un ciel totalement clair est représentée par la figure 2.6. De même, l'erreur absolue moyenne du lever au coucher du soleil est estimée à 28.65 W/m². Par ailleurs, l'erreur relative moyenne entre 9h et 18h est de 4.46%.

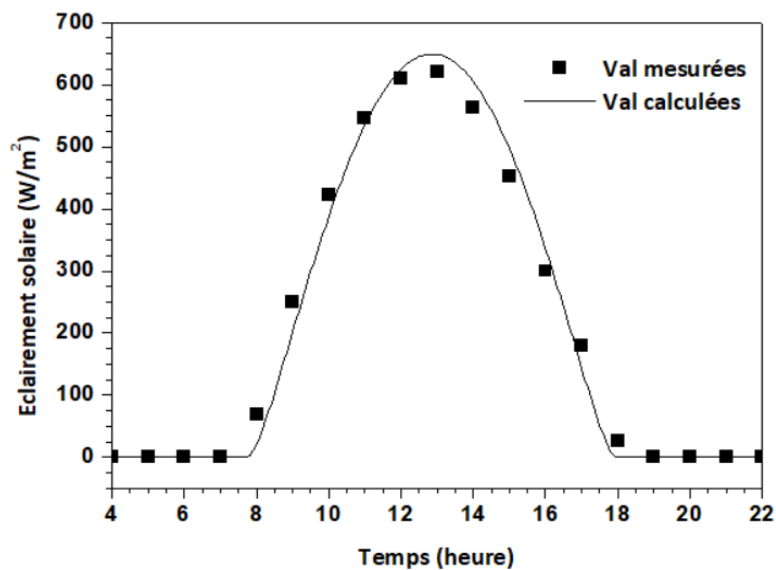


Figure 2. 5: Identification éclairement solaire incident sur une surface horizontale, cas de la journée du 06 Janvier à Ghardaïa

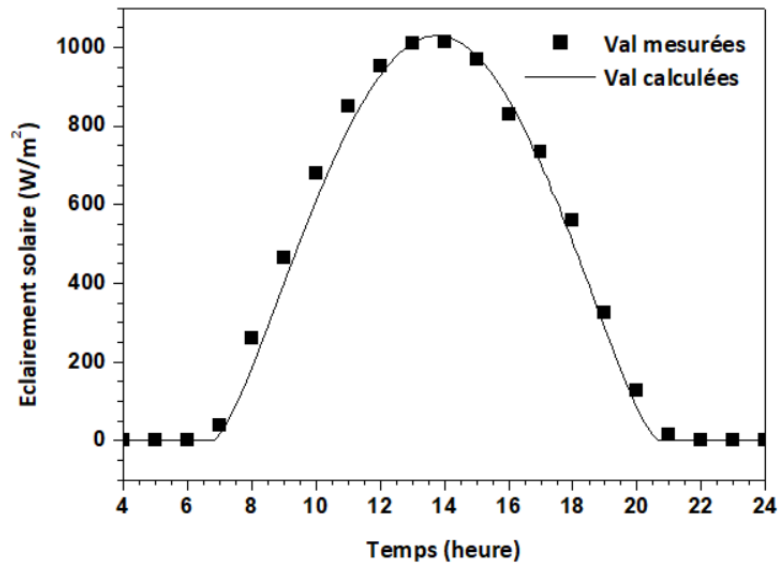


Figure 2. 6 : Identification éclairement solaire incident sur une surface horizontale, cas de la journée du 10 Juin à Ghardaïa

2.6. Le choix de l'inclinaison optimale

Il est possible de rectifier l'angle grâce d'un "tracker" appelé également "suiveur solaire". Mais pour un particulier, c'est un investissement jugé non rentable de par son coût d'achat et les coûts de maintenance associés.

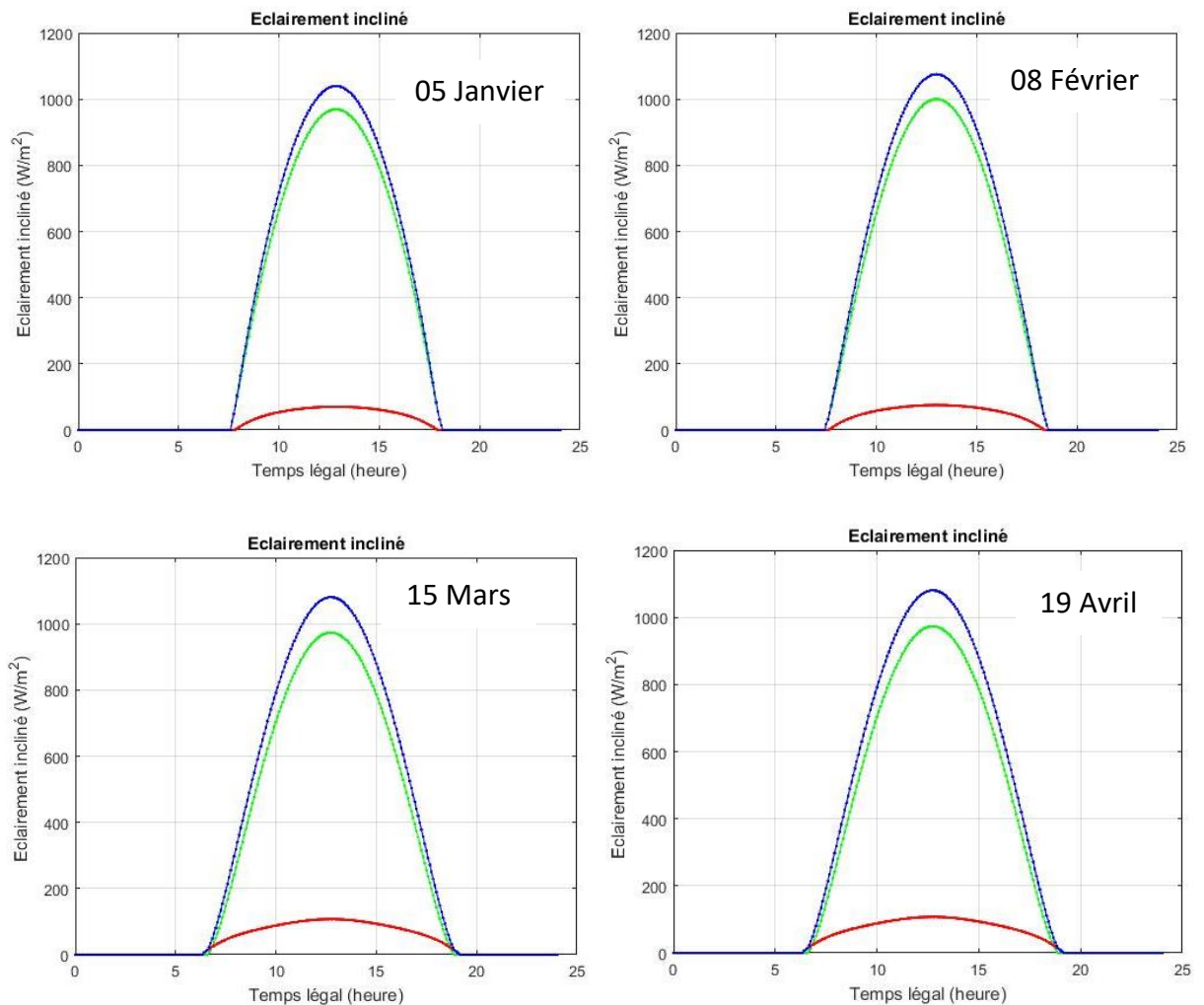
Durant les dernières années, El-Kassaby [26] a proposé un modèle analytique pour l'angle d'inclinaison optimal en fonction de l'angle de latitude pour chaque nombre de jours. En utilisant la méthode des moindres carrés, quatre formules empiriques ont été obtenues pour le calculer. Systématiquement, l'angle d'inclinaison optimal est prédit comme étant l'angle pour lequel la puissance moyenne maximale est obtenue. Les résultats expérimentaux se sont avérés correspondre assez bien à la prévision.

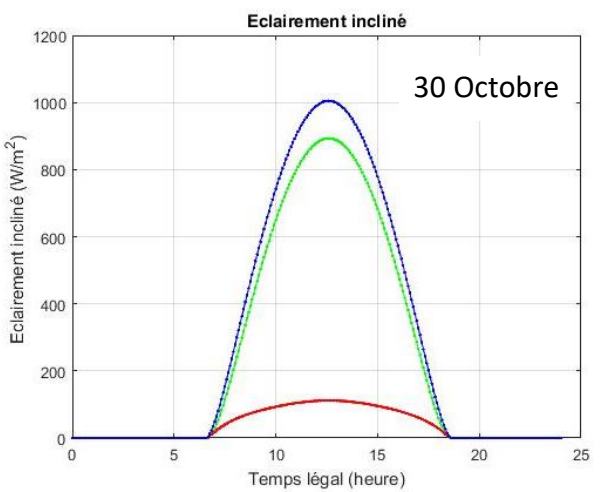
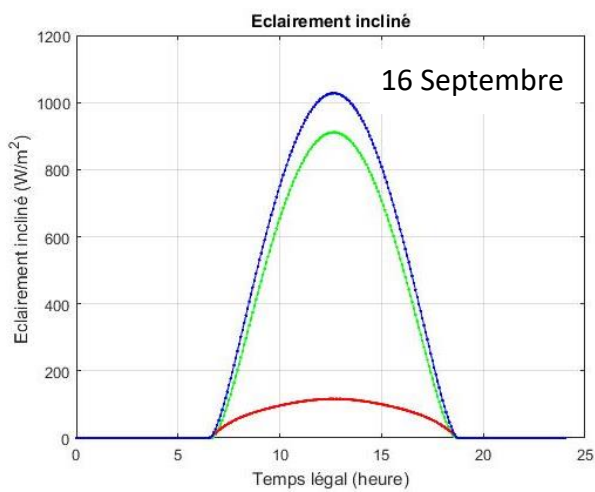
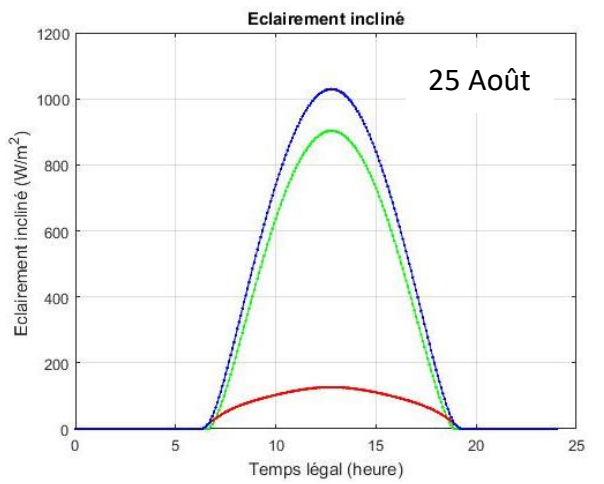
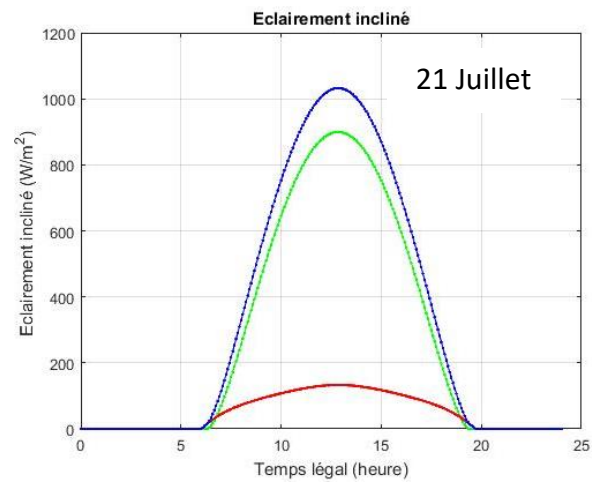
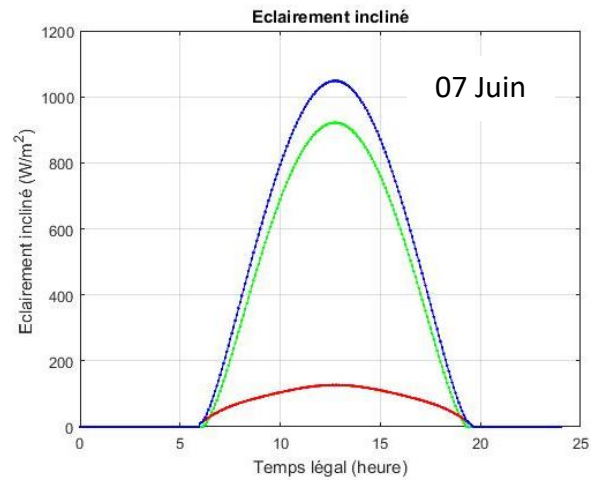
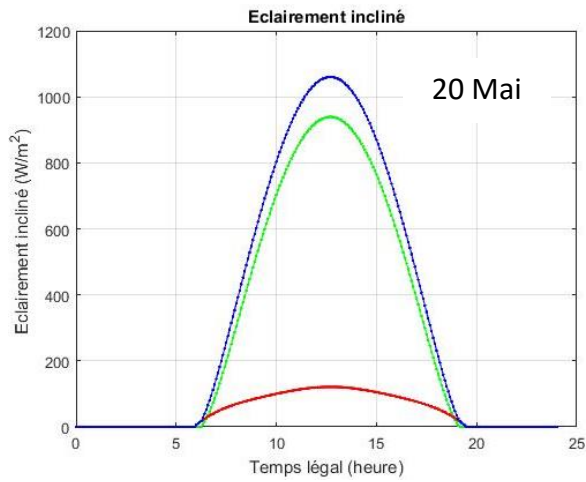
La pente des capteurs solaires est donc un critère fondamental afin de maximiser l'énergie solaire produite. En effet, le rendement est optimal si les rayons du soleil frappent perpendiculairement les capteurs. Il est donc nécessaire de trouver la pente optimale afin de trouver la trajectoire perpendiculaire des rayons du soleil. La trajectoire des rayons du soleil est variable en fonction des saisons. En été, le soleil est haut, en hiver, il est plus bas. Pour notre cas, nous essayerons de trouver l'angle qui maximisera au mois la production solaire. Nous nous intéressons aussi aux inclinaisons optimales déterminées par les équations 2.31 et 2.32 et les irradiances solaires calculées par le modèle de Capderou pour un ciel totalement clair. Le tableau 2.2 donne l'inclinaison optimale correspondante à des journées type de chaque mois de l'année. Selon les valeurs obtenues, l'inclinaison optimale est plus proche de la verticale en hiver, tandis qu'en été, elle est plus proche de l'horizontale.

Tableau 2. 2 : Inclinaisons optimales des journées type

Jour	Inclinaison optimale
05 Janvier 2024	54.27°
08 Février 2024	47.01°
15 Mars 2024	34.23°
19 Avril 2024	21.40°
20 Mai 2024	12.97°
07 Juin 2024	10.35°
21 Juillet 2024	12.32°
25 Aout 2024	22.15°
16 Septembre 2024	30.01°
30 Octobre 2024	45.85°
26 Novembre 2024	52.70°
28 Décembre 2024	54.88°

Faisant suite à ces pistes, nous avons privilégié l'utilisation du modèle de Capderou pour estimer l'irradiation journalière et le rayonnement solaire incident sur un plan incliné à l'angle optimal. Les courbes de la figure 2.7 décrivent les variations instantanées des composants de l'éclairement solaire à savoir : le diffus (en rouge), le direct (en vert) et le global (en bleu).





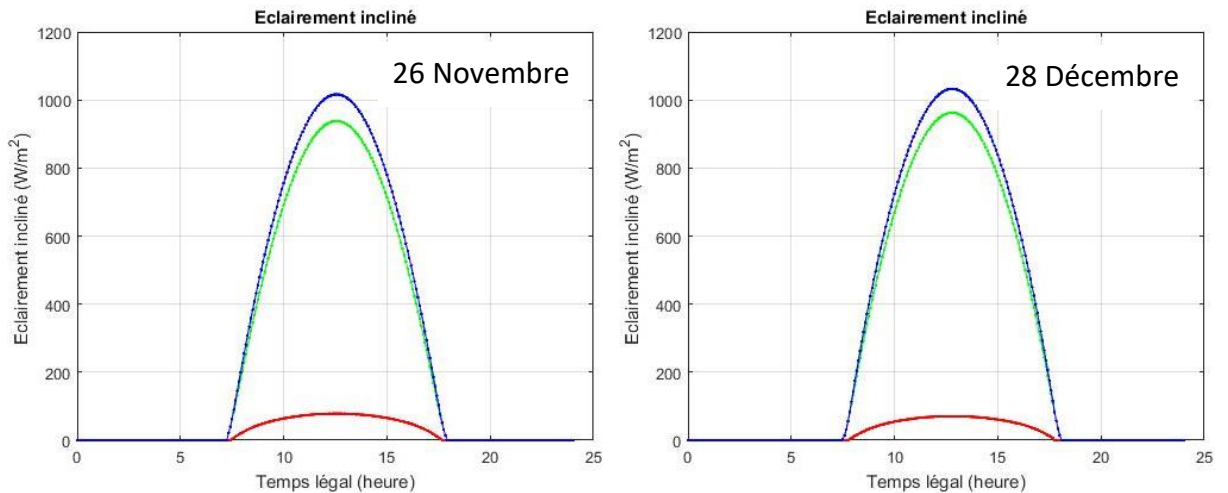


Figure 2. 7 : Éclairement solaire incident sur une surface inclinée optimale correspondant aux jours type, cas de la région de Ghardaïa

Le tableau 2.3 récapitule les valeurs des irradiations solaires calculées par l'approche de Capderou. Les chiffres mentionnés correspondent à une inclinaison optimale mensuelle.

Tableau 2. 3 : Irradiations solaires calculées (par kWh/m²) incidentes sur un capteur un plan d'inclinaison optimale, orienté au sud

Mois	Jour type	Inclinaison optimale mensuelle	Irradiations solaires calculées (kWh/m ²)
Janvier	5	52.43	7.1346
Février	8	44.83	7.5449
Mars	15	34.22	7.8239
Avril	19	23.02	8.0448
Mai	20	14.24	8.2430
Juin	07	10.01	8.2871
Juillet	21	11.89	8.0362
Août	25	19.10	7.5917
Septembre	16	29.49	7.3651
Octobre	30	40.70	7.0558
Novembre	26	50.04	6.9462
Décembre	28	54.60	7.0648

Pour la plupart des propriétaires, l'angle idéal pour l'installation d'un capteur solaire est proche ou égal à la latitude du lieu. Cet angle se situe généralement entre 30 et 45 degrés.

A chaque mois, l'interception de l'énergie solaire peut présenter une certaine différence entre l'inclinaison mensuelle optimale et l'inclinaison annuelle optimale. Selon la littérature [26], il est possible d'obtenir un minimum de 4 % d'irradiation supplémentaire en laissant le capteur à une inclinaison fixe chaque mois et non pas toute l'année.

2.7. Conclusion

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur Terre. Le flux annuel d'énergie solaire entrant à la surface de la Terre est environ 15 000 fois supérieur à la quantité d'énergie consommée.

L'objectif d'un chauffe-eau solaire est de produire le maximum d'énergie en s'assurant que le rayonnement solaire tombe sur ce capteur perpendiculairement. Lorsque le système intègre un suiveur solaire qui le déplace pour optimiser la capture du rayonnement solaire, cela augmente le coût total et les besoins de maintenance. C'est pourquoi cette étude a opté pour une méthode moins coûteuse, avec des capteurs fixes et inclinés selon les mois de l'année. Dans ce cas, il est utile de connaître l'inclinaison du panneau qui maximise le captage solaire pendant chaque mois.

Cette étude porte donc sur la détermination de l'inclinaison mensuelle optimale des capteurs solaires afin de maximiser l'irradiation incidente mensuelle sur ces derniers. Ainsi, les équations définissant l'inclinaison journalière optimale en fonction de la latitude pourraient être utilisées pour estimer l'inclinaison convenable.

Nous avons conclu que l'angle d'inclinaison optimal varie entre 9.73° (22 juin) et 55.05° (22 décembre) tout au long de l'année. En hiver (décembre, janvier et février), l'inclinaison doit être de 50.82° , au printemps (mars, avril et mai) de 23.84° , en été (juin, juillet et août) de 13.74° et en automne (septembre, octobre et novembre) de 40.09° .

Les irradiances solaires au site de Ghardaïa sont très propices à ce type d'installation. Avec une orientation au sud et une meilleure inclinaison (optimale mensuelle), il est possible d'atteindre une valeur de plus de 8 kWh/m^2 si le ciel est clair, ce qui est vraiment favorable aux applications liées aux énergies renouvelables en général.

Chapitre 3

Application à un capteur solaire plan à eau

Chapitre 3 : Application à un capteur solaire plan à eau

3.1. Introduction

L'énergie solaire peut potentiellement être utilisée pour fournir du chauffage et de l'énergie électrique. L'utilisation intensive de l'électricité et du gaz pour le chauffage a incité certains chercheurs [27] à proposer des solutions pour économiser l'énergie.

Malgré les avantages des systèmes classiques susmentionnés, les systèmes de chauffage solaire de l'eau sont considérés comme efficaces et économiques pour la production d'eau chaude. En Roumanie, par exemple, le chauffage solaire de l'eau a permis de réduire considérablement la consommation d'énergie, jusqu'à 71 %. Par conséquent, un taux considérable d'émissions de gaz à effet de serre a été réduit, estimé à 18.5 tonnes de CO₂ sur la durée de vie du système, avec une période d'amortissement actualisée de 6.8 à 8.6 ans [28]. À Oman, l'intégration des systèmes de chauffage de l'eau a donné lieu à un projet d'investissement intéressant pour les propriétaires et le gouvernement. Le retour sur investissement peut être compris entre 7 et 10 ans si la moitié du coût du capital est prise en charge par le gouvernement [29]. Une étude réalisée en Inde a montré qu'une incitation gouvernementale d'au moins 50% était nécessaire pour rendre le système de chauffage solaire de l'eau économiquement réalisable [30]. Dans la banlieue de Bangkok, en Thaïlande, il a été démontré que le chauffage solaire de l'eau peut répondre à au moins 88 % de la demande en eau chaude d'un logement typique, principalement utilisée pour le bain [31]. L'étude a montré que l'investissement dans le chauffage solaire de l'eau était économiquement plus intéressant que l'investissement dans les systèmes d'enveloppe ou d'éclairage. Šahic et al [32] ont démontré que des économies d'énergie électrique significatives (~30%) peuvent être réalisées en installant un système solaire pour le chauffage de l'eau sanitaire.

En conséquence, le contexte actuel nous oblige d'utiliser l'énergie solaire thermique pour obtenir de l'eau chaude sanitaire. De par la diversité de son utilisation et l'intérêt quelle porte à travers le monde, cette forme d'énergie a connu un grand essor ces dernières années. En plus de la production d'eau chaude, le fluide caloporteur chauffé dans les capteurs solaires plan peut également servir comme eau de chauffage. Dans la plupart des cas, l'énergie solaire ne peut pas assurer la totalité des besoins en énergie. Pour faire face à des périodes défavorables et satisfaire le maximum les besoins en chauffage et eau chaude, une bonne optimisation et une énergie d'appoint sont requises. Le premier objectif de ce chapitre est d'établir un cadre théorique pertinent pour l'ensemble des techniques à envisager. Le second est de mettre en évidence l'effet des conditions météorologiques et l'influence des paramètres de fonctionnement :

- Intensité du rayonnement solaire (orientation et inclinaison)
- Température ambiante
- Type de l'absorbeur : Influence de la couche sélective de l'absorbeur
- Influence de la température d'entrée de l'eau froide
- Influence de la distance entre la vitre et l'absorbeur

3.2. Éléments principaux d'un capteur solaire plan à eau

Un capteur plan est un dispositif agissant comme un échangeur de chaleur. Il convertit l'énergie solaire en énergie thermique. Il peut recueillir l'énergie solaire et l'utiliser pour chauffer l'eau de la maison pour le bain, le lavage, etc. Il peut également être utilisé pour chauffer les jacuzzis et les piscines. La figure 3.1 montre que les capteurs solaires plans à eau vitrés se composent de plusieurs éléments de base :

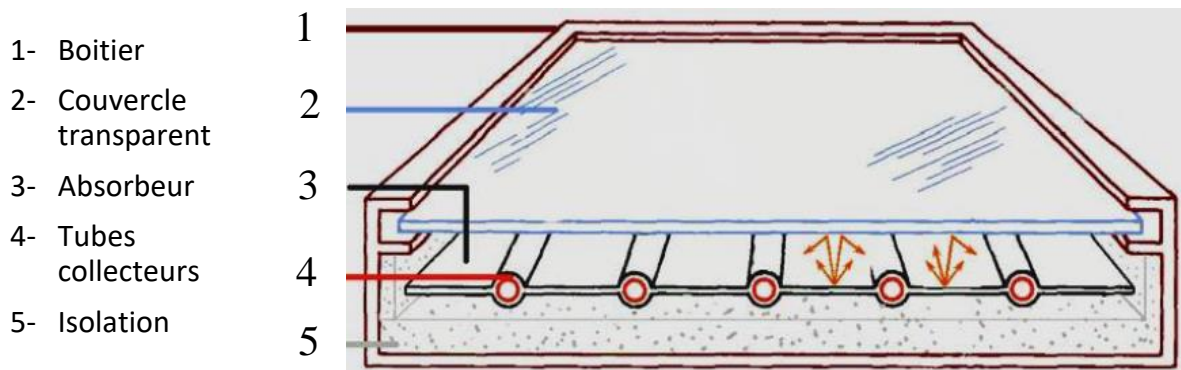


Figure 3.1 : Éléments constitutifs d'un capteur solaire plan à eau vitré

3.2.1. Boîtier

Le caisson ou bien le coffret du capteur solaire plan à eau est, en général, en acier inoxydable ou en aluminium anodisé.

Il est par définition le cadre qui tient tout l'équipement. Il doit être très solide et durable pour résister aux vents violents et à toute sorte d'intempéries...

3.2.2. Couvercle transparent

Il permet à l'énergie solaire de passer à travers le vitrage et réduit la perte de chaleur de l'absorbeur.

Le couvercle, posé avec un joint élastomère, doit présenter une bonne protection mécanique et une résistance aux brusques variations de températures. Leurs propriétés thermo-physiques engendrent la création du phénomène d'effet de serre. Ce dernier permet non seulement d'améliorer l'isolation thermique du capteur solaire, mais aussi de le protéger des

influences extérieures. Le vitrage n'a pas d'influence significative sur le chauffage, mais le capteur se refroidit nettement moins vite. Par conséquent, la vitre a également pour fonction de réduire le refroidissement de l'eau dans le capteur solaire en cas de nuages, ce qui permet de minimiser les pertes. Plus précisément, l'effet de serre consiste donc à confiner l'énergie transportée par le rayonnement solaire avec des déperditions minimales. C'est pour cette raison que cette paroi transparente au rayonnement solaire et opaque au rayonnement infrarouge est placée au-dessus d'un absorbeur peint en noir mat. Le rayonnement solaire traverse la couverture transparente et vient frapper la surface de l'absorbeur qui s'échauffe. Celui-ci émet vers l'extérieur un rayonnement thermique dans l'infrarouge (cas de longueurs d'onde supérieures à 4 μm). La vitre opaque à ce rayonnement va l'absorber et émettre à son tour vers l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture transparente. Le verre est caractérisé par un taux de transmission qui varie en fonction de sa nature et son épaisseur. Sa valeur peut atteindre 0.91 et 0.96 pour certains verres, dit antireflets [33].

D'autre part, en plus de sa fragilité et son poids, la dégradation des propriétés du verre au cours du temps peut présenter une contrainte gênante.

Une comparaison des matériaux peut être dressée conformément au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Comparaison des propriétés des vitres [34].

Matériau	Facteur de transmission solaire (%)	Densité volumique (kg/m^3)	Conductivité thermique (W/m k)	T maximale en utilisation continue ($^{\circ}\text{C}$)	Résistance aux chocs thermiques	Coefficient de dilatation thermique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Polycarbonate	82 - 89	1200	0.20			
Polyfluoroéthylène	97	02.15	0.25			
Polyflurure & Vinyle	93	01.50	0.12			
Plaque solide en Lexan	1 mm d'épaisseur Son poids est de 1.2 Kg/m^2	1200	0.20	120	Très bonne	60 10^{-6}
	2 mm d'épaisseur Son poids est de 2.4 Kg/m^2	1200	0.20	120	Très bonne	60 10^{-6}
Verre ordinaire moulé 4mm	80 - 88	2700	1.16		Très faible & Moyenne	9 10^{-6}
Plaque acrylique moulé	90	1190	0.20		Moyenne	80 10^{-6}

3.2.3. Absorbeur

Il intercepte et absorbe le rayonnement solaire puis transfère cette énergie à l'eau.

Il est constitué principalement d'un corps noir en métal noirci par une couche de peinture synthétique ayant des caractéristiques d'absorption proches de l'unité, un coefficient

d'émissivité thermique aussi faible que possible dans l'infrarouge et une bonne conductivité et diffusivité thermique. De ce fait, deux coefficients caractérisent ces absorbeurs :

- Un coefficient d'absorption " α " qui varie de 0 à 1 avec une valeur optimale de 1, et
- Un coefficient d'émissivité thermique " ε " variant de 0 à 1 avec une valeur idéale de 0.

Pour parvenir à ces caractéristiques idéales, l'absorbeur doit être revêtu par une couche fine sélective par des traitements de surface. Le tableau 3.2 résume de manière générale les principales propriétés optiques des revêtements sélectifs.

Toutefois, la plaque absorbante doit être déformée et soudée avec les tubes sur toute sa longueur pour faire passer la chaleur au fluide circulant dans ces tubes en adoptant les techniques de clipsage ou de brasage. La figure 3.2 donne un schéma descriptif.

Tableau 3.2 : Les revêtements sélectifs les plus courants [35]

La nature du revêtement sélectif	La matière de la plaque absorbante	Coefficient d'absorption solaire " α "	Coefficient d'émissivité " ε "
Chrome noir	Cuivre & Acier	0.91 - 0.96	0.07 - 0.16
Cuivre noir	Cuivre & Nickel & Aluminium	0.81 - 0.93	0.11 - 0.17
Nickel noir	Nickel & Acier	0.89 - 0.96	0.07 - 0.17
Oxyde d'aluminium	Aluminium	0.90	0.10 - 0.40
Oxyde de fer	Acier	0.85	0.08

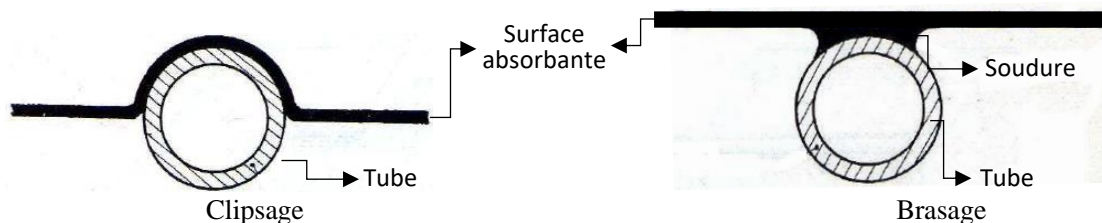


Figure 3.2 : Clipsage et brasage des tubes sous la plaque absorbante

La technique utilisée donne un absorbeur formé de tubes parallèles écartés par une distance comprise entre 5 à 15 cm, reliés en haut et en bas par deux collecteurs. Le montage hydraulique des tubes et sa configuration sont de type Tickelman afin d'équilibrer les débits entrant et sortant conformément à la figure 3.3.

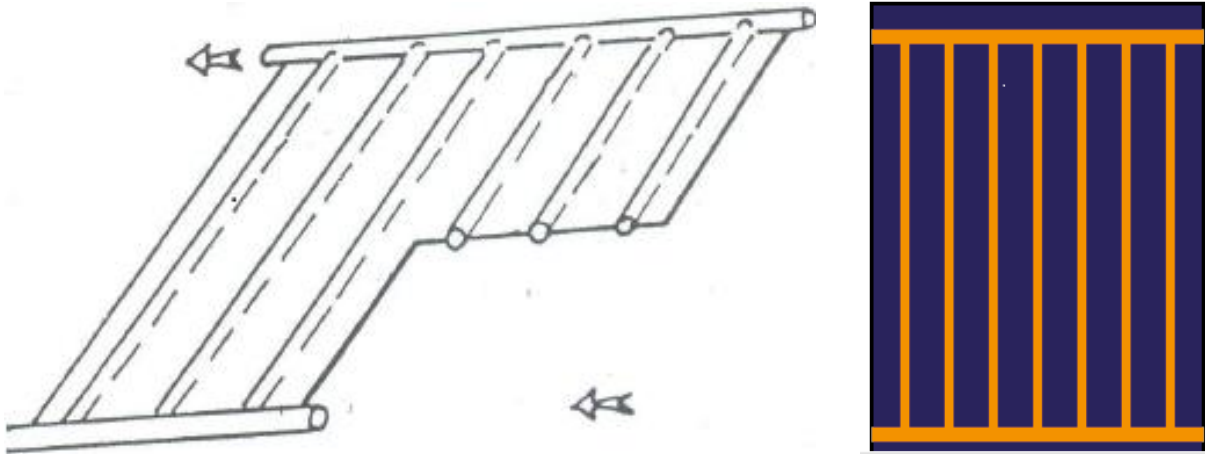


Figure 3.3 : Capteur solaire plan de type "échelle", cas d'un montage hydraulique des tubes de type Tickelman

3.2.4. La lame d'air

Selon la littérature, le chauffe-eau avec une lame d'air de 50 mm recueille 11.64 % et 7.72 % d'énergie en plus par rapport aux chauffe-eau avec des lames d'air de 25 mm et 150 mm, respectivement. Les rendements globaux moyens sont de 52.5 %, 57.8 % et 54.1 % pour des épaisseurs de 25, 50 et 150 mm. Une lame d'air de 50 mm s'est donc avérée optimale.

Si la lame d'air est entre 2.5 et 4 cm, le coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre reste invariant. Si l'épaisseur est plus faible, l'air étant immobile, le mode de transfert de chaleur dominant est la conduction. Pour des épaisseurs supérieures à 4 cm, les mouvements de convection sont importants et le coefficient d'échange n'est guère amélioré. CHAPMAN [33] nous a proposé une condition pour garantir une épaisseur optimale :

$$Ep^3 (T_U - T_e) < k \quad (3.1)$$

K : Conductivité du fluide caloporteur (W/m K).

T_U : Température d'utilisation (°C).

T_e : Température du réseau d'alimentation (°C).

Cette formule donne lieu à des épaisseurs variant de 2 à 4 cm.

3.2.5. L'isolation

Le chauffe-eau plan à eau est en principe bien isolé thermiquement par des matériaux d'une épaisseur comprise généralement entre 5 à 10 cm de faible conductivité thermique. Cette configuration permet une limitation conséquente des pertes thermiques arrières et latérales par conduction.

Généralement, l'épaisseur de l'isolant est de l'ordre de 5 à 10 cm, c'est une couche d'isolation à l'arrière et à l'avant de l'absorbeur pour réduire les pertes de chaleur. Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Propriétés des isolants thermiques.

Isolant thermique	Conductivité thermique maximale $W m^{-1} K^{-1}$	Température maximale $^{\circ}C$
Laine de verre [36] 	0.041	150
Laine de roche [37-39] 	0.050	150
Mousses de polyuréthane [40] 	0.027	110
Polystyrène [41] 	0.039	85
Liège expansé [42] 	0.042	110

3.3. Bilan énergétique d'un capteur solaire plan à eau en régime dynamique

Réellement, les chauffe-eau solaires ne fonctionnent jamais en régime stationnaire en raison de la variation du flux solaire incident au cours de la journée et des changements radicaux des paramètres environnementaux.

Dans les transferts de chaleur transitoires, l'énergie thermique transférée à travers le milieu n'est pas constante. Le débit du flux de chaleur varie constamment, les variations du taux de transfert de chaleur peuvent être dus soit aux différences de température fluctuantes sur le milieu, soit aux changements dans les propriétés du milieu.

Le transfert de chaleur dynamique des surfaces s'effectue simultanément par conduction, convection et rayonnement thermiques. Pour ce faire, nous retenons les hypothèses ci-dessous, tout en considérant que l'eau (fluide caloporteur) circule dans les tubes situés sous l'absorbeur [23, 43].

- La surface d'incidence est uniformément irradiée,
- Le ciel est supposé comme étant un corps noir à la température T_{Ciel} ,
- La température est considérée homogène dans chaque élément,
- Le flux de chaleur est unidimensionnel et perpendiculaire aux surfaces,
- Les pertes thermiques avant et arrière sont retenues à la même température ambiante, et,
- La poussière, les masques et les surfaces opaques en général sont considérées négligeables.

La figure 3.4 représente notre modèle de capteur solaire qui met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique.

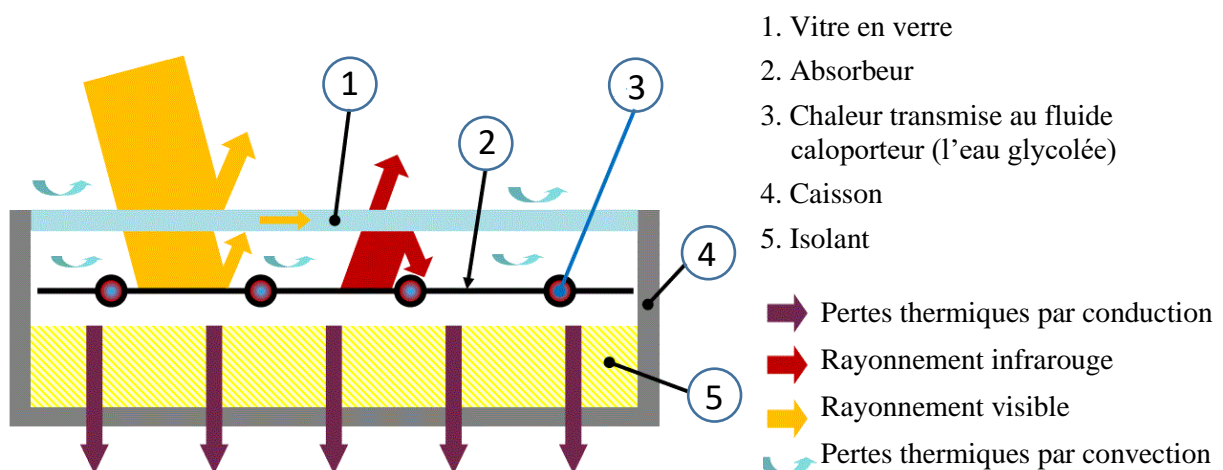


Figure 3.4 : Échanges thermiques dans un capteur solaire plan vitré à eau [15].

3.3.1. Bilan thermique du vitrage

Ce bilan se traduit par la quantification des pertes entre l'extérieur et la vitre. Elles sont évaluées en déterminant les pertes par convection avec l'air ambiant extérieur et par rayonnement qui se fait par réflexion via ce vitrage [23].

$$M_V C_{pV} \frac{\partial T_V}{\partial t} = \alpha_V G_{\text{Solaire}} S_V - Q_{cv_{V-Ext}} - Q_{r_{V-Ciel}} + Q_{cv_{Abs-V}} + Q_{r_{Abs-V}} \quad (3.2)$$

Nous désignons par :

- V : Le vitrage, c'est-à-dire le couvercle transparent.
- M : La masse (kg).
- Cp : La chaleur spécifique (ou capacité thermique massique), définie par la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse du corps ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
- T : La température (K).
- t : Le temps (s).
- α : Coefficient d'absorption solaire.
- G_{Solaire} : Densité du flux solaire ($W \text{ m}^{-2}$).
- S : La surface (m^2).
- Ext : L'air ambiant extérieur
- Ciel : Voûte circonscrite par l'horizon (la voûte du ciel)
- Abs : Plaque absorbante (absorbeur)

Le **flux de chaleur échangé par convection entre la vitre et l'air extérieur** est exprimé par la relation suivante [23] :

$$Q_{cv_{V-Ext}} = h_{cv_{V-Ext}} S_V (T_V - T_{Ext}) \quad (3.3)$$

Les pertes de chaleur via la surface extérieure de la vitre vers le milieu ambiant extérieur sont principalement dominées par les échanges convectifs avec l'air ambiant et les échanges par rayonnement avec le ciel. La vitesse du vent influe sensiblement sur le transfert de chaleur convectif. Le coefficient dû à ces échanges peut être calculé par la relation suivante [44] :

$$h_{cv_{V-Ext}} = \begin{cases} 5.67 + 3.84 V_{\text{Vent}} & \text{et on trouve des fois } 2.8 + 3 V_{\text{Vent}} \text{ si } V_{\text{Vent}} < 5 \text{ m/s} \\ 6.15 V_{\text{Vent}}^{0.8} & \text{si } V_{\text{Vent}} > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3.4)$$

- V_{Vent} : La vitesse du vent (m/s).

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre et l'air extérieur [23] :

$$Q_{r\ V-Ciel} = h_{r\ V-Ciel} S_V (T_V - T_{Ciel}) \quad (3.5)$$

$$h_{r\ V-Ciel} = \varepsilon_V \frac{T_V^4 - T_{Ciel}^4}{T_V - T_{Ext}} \quad (3.6)$$

La température du ciel est déduite de la formule connue suivante [23, 45] :

$$T_{Ciel} = 0.0552 T_{Amb}^{1.5} \quad (3.7)$$

T_{Amb} : La température du milieu ambiant extérieur (K).

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur [23] :

$$Q_{r\ Abs-V} = S_{Abs} \varepsilon_{Abs-V} \sigma (T_{Abs}^4 - T_V^4) = h_{r\ Abs-V} S_{Abs} (T_{Abs} - T_V) \quad (3.8)$$

Avec :

$$\frac{1}{\varepsilon_{Abs-V}} = \frac{1}{\varepsilon_{Abs}} + \frac{1}{\varepsilon_V} - 1 \quad (3.9)$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Donc :

$$h_{r\ Abs-V} = \varepsilon_{Abs-V} \sigma (T_{Abs}^2 + T_V^2) (T_{Abs} + T_V) \quad (3.10)$$

Entre la vitre et l'absorbeur, la distribution des champs d'écoulement permet de retenir que le mode de convection est dominant par rapport au transfert de chaleur par conduction. La raison physique de ce phénomène est que la présence d'un gradient de température entre la surface de la source de chaleur (absorbeur) et l'air génère une force de flottabilité qui, à son tour, affecte et renforce le transfert de chaleur par convection. Le **flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage** est donné par l'équation suivante [23] :

$$Q_{cv\ Abs-V} = h_{cv\ Abs-V} S_{Abs} (T_{Abs} - T_V) \quad (3.11)$$

$$h_{cv\ Abs-V} = Nu_{air} \frac{k_{air}}{b} \quad (3.12)$$

$$Nu_{air} = 1 + \left(1 - \frac{1708}{Gr\ Pr\ \cos(\beta)}\right) \left(\frac{|x| + x}{2}\right) \left(\frac{|y| + y}{2}\right) \quad (3.13)$$

$$x = 1 - \frac{1780 \sin(1.8 \beta)}{Gr\ Pr\ \cos(\beta)} \quad (3.14)$$

$$y = 1 - \frac{(Gr\ Pr\ \cos(\beta))^{1/3}}{5830} \quad (3.15)$$

ε : Coefficient d'émissivité

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

Nu : Nombre de Nusselt

k_{air} : Conductivité thermique de l'air (0.024 W/Km)

b : Distance entre l'absorbeur et le couvercle transparent (m)

Gr : Nombre de Grashof

Pr : Nombre de Prandtl de l'air, il se calcule par la corrélation donnée par l'équation 3.14 [46]

β : L'angle d'inclinaison ($^{\circ}$)

$$Pr = -2.54 \cdot 10^{-4} (T - 273.15) + 0.7147 \quad r^2 = 0.9767 \quad (3.16)$$

Le nombre de Grashof est défini comme suit [46] :

$$Gr = \frac{g \Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} = \frac{g \Delta T L_c^3}{\nu^2} \quad (3.17)$$

g : L'accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$)

ΔT : Le coefficient de dilatation (K^{-1}), estimé approximativement à $1/T$

ΔT : La différence de température entre la paroi et l'air au repos (K)

L_c : La longueur caractéristique (m)

ρ : La masse volumique du fluide ($kg \cdot m^{-3}$)

μ : La viscosité dynamique du fluide ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ou Pa s) [46]

ν : La viscosité cinématique ($m^2 \cdot s^{-1}$)

$$\mu = 10^{-5} (0.0046 (T - 273.15) + 1.7176) \quad r^2 = 0.9997 \quad (3.18)$$

La viscosité cinématique s'obtient en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide.

3.3.2. Bilan thermique de l'absorbeur

Le modèle mathématique du capteur solaire traduit l'absorption du rayonnement solaire et l'échange de chaleur avec le fluide caloporteur (l'eau). Le bilan énergétique externe de l'absorbeur (transfert de chaleur de la surface de l'absorbeur vers l'environnement ambiant) et le bilan énergétique interne de l'absorbeur (transfert de chaleur de la surface de l'absorbeur vers le fluide caloporteur) peuvent être formulés conformément à l'équation suivante [23] :

$$M_{Abs} C_{pAbs} \frac{\partial T_{Abs}}{\partial t} = \alpha_{Abs} \tau_V G_{Solaire} S_{Abs} - Q_{CV\ Abs-V} - Q_{r\ Abs-V} - Q_{CV\ Abs-Eau} - Q_{cd\ Abs-Isolant\ arriere} \quad (3.19)$$

Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau)

est exprimé par l'équation suivante [23] :

$$Q_{CV\ Abs-Eau} = h_{CV\ Abs-Eau} S_{Tube\ Abs} (T_{Abs} - T_{Eau}) \quad (3.20)$$

$$h_{CV\ Abs-Eau} = Nu_{Eau} \frac{k_{Eau}}{d_i} \quad (3.21)$$

$$Nu_{Eau} = \frac{\Omega}{8} \frac{(Re - 10^3) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (3.22)$$

Cette relation est valable pour $0.6 < Pr < 2000$, $2300 < Re < 10^6$. Pour notre cas, cette condition est vérifiée.

$$Re = \frac{V d_i}{\mu} \quad (3.23)$$

Si l'écoulement d'eau est turbulent lisse, le coefficient de Darcy est en fonction du nombre de Reynolds.

La formule de Blasius ci-dessous doit être appliquée si $2300 \leq Re \leq 10^5$ [23] :

$$\Omega = 0.3164 Re^{0.25} \quad (3.24)$$

Si $10^5 \leq Re \leq 10^6$, nous utilisons la formule de Herman conformément à l'équation suivante [23] :

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 Re^{0.3} \quad (3.25)$$

Ω : Le coefficient de Darcy

Pr : Nombre de Prandtl de l'eau, il se calcule par la corrélation donnée par l'équation 3.23 [46]

d_i : Diamètre intérieur du tube (m)

l : Longueur du tube (m)

μ : Viscosité dynamique de l'eau (Pa s), il se calcule par la corrélation donnée par l'équation 3.24 [46]

V : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

$$Pr = 1.577 \cdot 10^{-3} (T - 273.15)^2 - 0.26 (T - 273.15) + 12.501 \quad (3.26)$$

$$r^2 = 0.9796$$

$$\mu = 10^4 (0.002 (T - 273.15)^2 - 0.3389 (T - 273.15) + 17.199) \quad (3.27)$$

$$r^2 = 0.9815$$

La densité volumique est estimée en fonction de la température de l'eau.

$$\rho = -0.0038 (T - 273.15)^2 - 0.0505 (T - 273.15) + 1002.6 \quad (3.28)$$

$$r^2 = 0.9982$$

L'équation 3.29 a permis de convertir la vitesse V en débit volumique q_v ou massique q_m dans une gaine de section S .

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = V S \quad (3.29)$$

Nous considérons que le **flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolation arrière** est proche de la valeur obtenue de l'équation suivante [23] :

$$Q_{cd \text{ Abs-Isolant arrière}} = hcd_{\text{Abs-Isolant arrière}} S_{\text{Abs}} (T_{\text{Abs}} - T_{\text{Isolant arrière}}) \quad (3.30)$$

$$hcd_{\text{Abs-Isolant arrière}} = \frac{e_{\text{Isolant arrière}}}{k_{\text{Isolant arrière}}} \quad (3.31)$$

$e_{\text{Isolant arrière}}$: Épaisseur de l'isolation arrière (m)

$k_{\text{Isolant arrière}}$: Conductivité thermique de l'isolant (W/Km)

3.3.3. Bilan thermique du fluide caloporteur

Le fluide caloporteur dans ce cas est l'eau qui est un fluide qui par ses propriétés physiques permet de transporter de la chaleur. Le bilan thermique peut être exprimé par l'équation suivante [23] :

$$M_{\text{Eau}} C_{p\text{Eau}} \frac{\partial T_{\text{Eau}}}{\partial t} = Q_{cv \text{ Abs-Eau}} - q_m C_{p\text{Eau}} (T_{\text{Eau}} - T_{\text{Eau-Entrée}}) \quad (3.32)$$

La masse de tout élément peut être écrite sous la forme suivante :

$$M_{\text{Eau}} = \frac{\rho}{\text{Volume}} \quad (3.33)$$

3.4. Rendement

Par définition, le rendement mesure l'efficacité du capteur, exprimé par le rapport entre la puissance thermique (utile) fournie à l'eau (fluide caloporteur) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la surface utile de ce capteur.

$$\eta = \frac{Q_U}{S_{Abs} G_{Solaire}} \quad (3.34)$$

Q_U : La puissance utile (W).

La puissance utile peut être donnée par l'équation 3.35 :

$$Q_U = S_{Abs} (\alpha_{Abs} \tau_V G_{Solaire} - U_{global} (T_{Abs} - T_{Ext})) \quad (3.35)$$

Si elle est forcée, la puissance utile expérimentale correspond à l'équation 3.36 :

$$Q_U = S_{Abs} q_m C_{pEau} (T_{Eau-Sortie} - T_{Eau-Entrée}) \quad (3.36)$$

Pour ce cas, correspondant à une convection forcée nous adoptons l'approche suivante :

$$Q_U = Fr S_{Capteur} (\alpha_{Abs} \tau_V G_{Solaire} - U_{global} (T_{Eau-Entrée} - T_{Ext})) \quad (3.37)$$

$$Fr = \frac{q_m C_{pEau}}{S_{Capteur} U_{global}} \left(1 - e^{-\frac{S_{Capteur} U_{global} F'}{q_m C_{pEau}}} \right) \quad (3.38)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_{global}}}{\left(w \left(\frac{1}{U_{global} (de + (w - de) F)} + \frac{es}{bs \lambda_S} + \frac{1}{di h_{cv_{Abs-Eau}}} \right) \right)} \quad (3.39)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_{global}}{e_{Abs} \lambda_{Abs}}} \quad (3.40)$$

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m}{2}(w - de)\right)}{\frac{m}{2}(w - de)} \quad (3.41)$$

w : Distance entre les tubes (m)

de : Diamètre extérieur du tube (m)

di : Diamètre intérieur du tube (m)

es : Épaisseur de la soudure (m)

bs : Largeur de la soudure (m)

λ_S : Conductivité thermique de la soudure (W/K m)

λ_{Abs} : Conductivité thermique du tube et de la plaque absorbante (W/K m)

e_{Abs} : Épaisseur du tube et de la plaque absorbante (m)

Avec

$$U_{\text{global}} = U_{\text{Avant}} + U_{\text{Arrière}} + U_{\text{Latéral}} \quad (3.42)$$

Le coefficient de pertes global du capteur sera déduit via le schéma électrique simplifié donné par la figure 3.5.

Une conductance électrique sous à une différence de potentiel mesure sa capacité à laisser passer un courant électrique. C'est une grandeur réelle, définie comme étant l'inverse de la résistance électrique.

$$U_{\text{Avant}} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{hcv_{V-\text{Ext}} + hr_{V-\text{Ciel}}}\right) + \left(\frac{1}{hcv_{\text{Abs}-V} + hr_{\text{Abs}-V}}\right)} \quad (3.43)$$

$$U_{\text{Arrière}} = \frac{1}{R_3} = \frac{k_{\text{Isolant arrière}}}{e_{\text{Isolant arrière}}} \quad (3.44)$$

$$U_{\text{Latéral}} = \frac{k_{\text{Isolant latéral}}}{e_{\text{Isolant latéral}}} \quad (3.45)$$

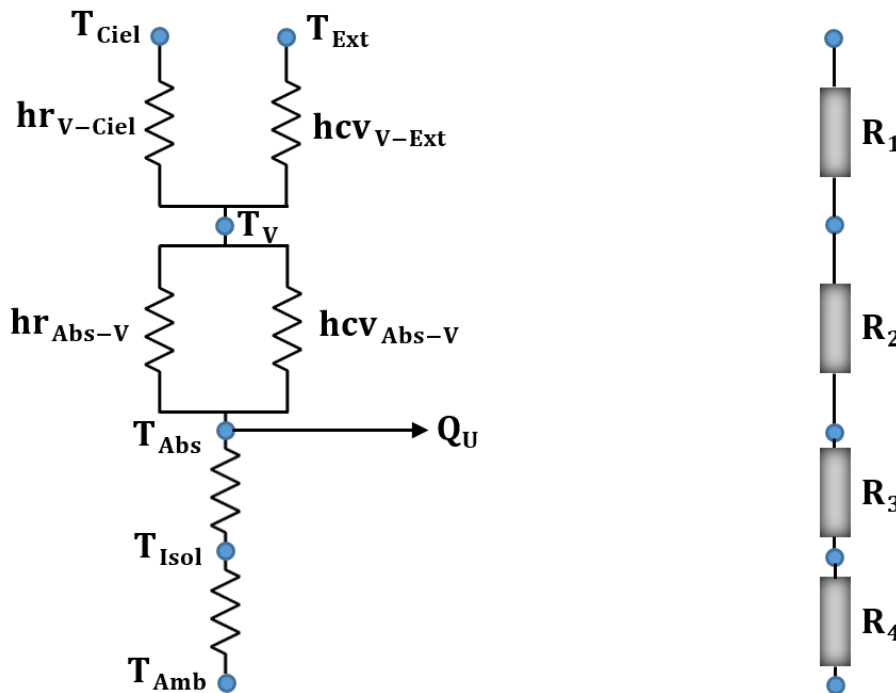


Figure 3.5 : Schéma d'analogie électrique du capteur plan à eau [23].

—⚡— Conductance ■ Résistance

R_1 : Résistance thermique équivalente entre le milieu extérieur et le couvercle transparent
($m^2 K / W$)

R_2 : Résistance thermique équivalente entre le couvercle et l'absorbeur ($m^2 K / W$)

R_3 : Résistance thermique équivalente entre l'absorbeur et l'isolant ($m^2 K / W$)

R_4 : Résistance thermique équivalente entre l'isolant et le milieu ambiant sous le capteur
($m^2 K / W$)

$$R_4 = \frac{1}{h_{cv} \text{ Isolant latéral} - \text{Amb}} \quad (3.46)$$

3.5. Simulation numérique et résultats obtenus

3.5.1. Fiche technique du capteur plan

Les données techniques et la fiche détaillée de ce type de chauffe eau solaire sont résumées selon les tableau 3.4 et 3.5 suivants :

Tableau 3.4 : Propriétés Fiche technique du capteur solaire plan à eau

Capteur	Surface totale	2.613 (m ²)			
	Diamètre des tubes	22 mm			
	Longueur des tubes	Verticaux		Horizontaux	
		Nombre	Longueur	Nombre	Longueur
		10	1.95 m	2	1.2 m
	Surface	2.31 m ²			
	Épaisseur	0.2 mm			
	Distance entre les tubes	11.64 cm			
Absorbeur (tubes et plaques)	Diamètre intérieur du tube	20 mm			
	Diamètre extérieur du tube	22 mm			
	L'épaisseur de la soudure	3 mm			
	La largeur de la soudure	3 mm			
	Conductivité thermique	240 W/m K			
	Masse volumique	2698 kg/m ³			
	Capacité thermique	897 J/kg/K			
	Coefficient d'émissivité	0.85 (peinture noir non sélective)			
	Coefficient d'absorption	0.90			

	C'est du verre traité avec des propriétés mécaniques plus améliorées. Il est de 2 à 5 fois plus résistant qu'un verre ordinaire		
Vitrage (verre trempé)	Surface	2.28 m ²	
	Épaisseur de la vitre	3.5 mm	
	Distance entre la vitre et l'absorbeur	10 cm	
	Conductivité thermique	1.0 W/mK	
	Masse volumique	2650 kg/m ³	
	Capacité thermique	720 J/kg/K	
	Coefficient d'émissivité	0.93	
	Coefficient d'absorption	0.02	
	Coefficient de transmission	0.87	
Isolation thermique (laine de verre peu émissive)		Arrière	Latérale
	Surface	2.31 m ²	1.6 m x 0.15 m
	Épaisseurs	4 cm	2 cm
	Conductivité thermique	0.04 W/mK	
	Masse volumique	35 kg/m ³	
	Capacité thermique	919 J/kg/K	
		0.1	

Tableau 3.5 : Approches utilisées pour déterminer les propriétés thermo-physiques (T en °C) [23]

Grandeurs physiques	Formule	Coefficient de régression
Masse volumique	$\rho = \frac{353}{T + 273.15} \text{ kg/m}^3$	
Capacité thermique	$C_p = 1008 \text{ J/ kg/}^\circ\text{C}$	
Conductivité thermique	$\lambda = 7.57 \cdot 10^{-5} T + 0.0242 \text{ W/m/ }^\circ\text{C}$	$R^2 = 0.9999$
L'air Viscosité dynamique	$\mu = 10^{-5} (0.0046 T + 1.7176) \text{ Pa s}$	$R^2 = 0.9997$
Viscosité cinématique	$\alpha = 10^{-5} (0.0146 T + 1.8343) \text{ m}^2/\text{s}$	$R^2 = 0.9986$
Le nombre de Prandtl	$Pr = - 2.54 \cdot 10^{-4} T + 0.7147$	$R^2 = 0.9767$
Le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne	$\beta = \frac{1}{T + 273.15}$	

Grandeurs physiques	Formule	Coefficient de régression
Masse volumique	$\rho = -3.8 \cdot 10^{-3} T^2 - 0.0505 T + 1002.6 \text{ kg/m}^3$	
Capacité thermique	$C_p = 4180 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$	
L'eau Conductivité thermique	$\lambda = -9.87 \cdot 10^{-6} T^2 + 2.238 \cdot 10^{-3} T + 0.5536 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$	$R^2 = 0.9987$
Viscosité dynamique	$\mu = 10^{-4} (0.002 T^2 - 0.3389 T + 17.199) \text{ Pa s}$	$R^2 = 0.9815$
Viscosité cinématique	$\alpha = 10^{-7} (-0.0036 T + 1.34) \text{ m}^2/\text{s}$	$R^2 = 0.9734$
Le nombre de Prandtl	$Pr = 1.577 \cdot 10^{-3} T^2 - 0.261 T + 12.501$	$R^2 = 0.9796$

3.5.2. Description succincte de la région de Ghardaïa (d'étude)

Il est à rappeler que la région de Ghardaïa est une région située dans le nord du Sahara septentrional, caractérisée par un climat chaud et sec en été et froid en hiver. L'altitude de Ghardaïa est de 503m au-dessus du niveau de la mer, sa Latitude : 32°29'27'' Nord, et sa Longitude : 3°40'24'' Est.

Les statistiques indiquent que le climat est désertique avec des hivers doux et très froids la nuit et des étés très chauds et ensoleillés. L'état du ciel est clair au cours d'une bonne partie de l'année, mais les vents sont parfois fréquents. La durée du jour à Ghardaïa varie considérablement au cours de l'année. Le jour le plus court est le 21 décembre avec une durée d'insolation d'environ 10 heures et 1 minute, par ailleurs, le jour le plus long est celui du 21 juin avec une durée d'environ 14 heures et 06 minutes. A Ghardaïa, l'indice de clarté a sensiblement varié selon les mois. Le mois le plus clair de l'année où le ciel est généralement dégagé est celui d'août. La période la plus claire de l'année dure presque trois mois et commence généralement au début du mois de juin. Le mois le plus nuageux de l'année durant lequel le ciel est généralement couvert ou nuageux environ 79.47% du temps est celui d'octobre. Le taux de clarté annuel est très élevé, estimé à 88.87% [47].

La vitesse du vent à Ghardaïa connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure presque 6 mois et 10 jours, plus précisément du 31 décembre au 10 juillet, avec des vitesses moyennes supérieures à 14.9 km/h. Le mois le plus venteux de l'année à Ghardaïa est avril, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 16.5 km/h. La période la plus calme dure presque 5.7 mois, du 10 juillet au 31 décembre. Le mois le plus calme de l'année à Ghardaïa est octobre, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 13.4 km/h [48, 49].

3.5.3. Résultats

Pour la résolution du problème mathématique, nous avons utilisé la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 qui est une méthode efficace et largement utilisée pour résoudre les problèmes d'équations différentielles. La technique est une approche efficace et couramment utilisée pour résoudre les problèmes de valeurs initiales des équations différentielles. Elle est utilisée aussi pour générer des méthodes numériques précises d'ordre élevé sans qu'il soit nécessaire de recourir aux dérivées d'ordre élevé des fonctions.

Pour effectuer cette étude, le choix a été porté sur le jour du 10 janvier, qui correspond au mois le plus froid de l'année. Le jour chaud du 20 juillet est retenu pour tester l'influence de l'orientation sur les caractéristiques du capteur plan à eau. Les simulations numériques concernent les températures de l'absorbeur, du fluide caloporteur, du coefficient de pertes global, la puissance utile et le rendement qui mesure l'efficacité du chauffe-eau solaire. Les paramètres retenus considèrent à chaque cas la température de l'eau à l'entrée du capteur, la distance entre la vitre et l'absorbeur, la variation de l'inclinaison, l'orientation et l'apport de la couche sélective de la plaque absorbante. Par ailleurs, selon N Boudoumi et C Bousalem [50], l'effet du débit sur le rendement n'est pas assez grand si le flux solaire et les conditions météorologiques sont stables.

3.5.3.1. Influence de la température de l'eau froide à l'entrée du capteur solaire

La représentation graphique des températures (l'absorbeur et le fluide caloporteur), du coefficient de pertes global, la puissance utile et le rendement sont donnés par les figures 3.6-3.10.

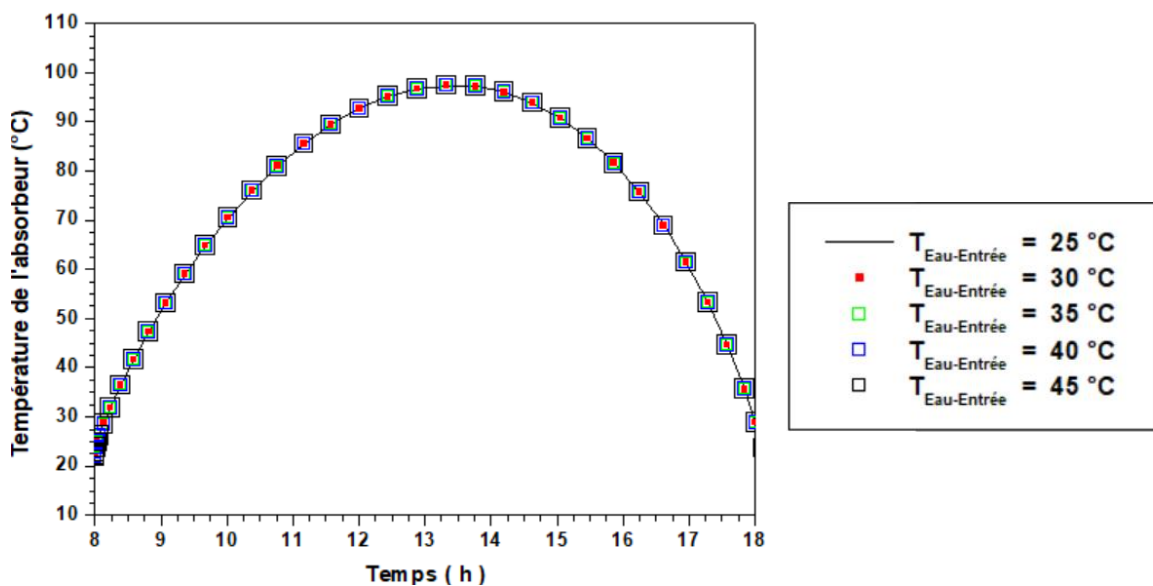


Figure 3.6 : Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.

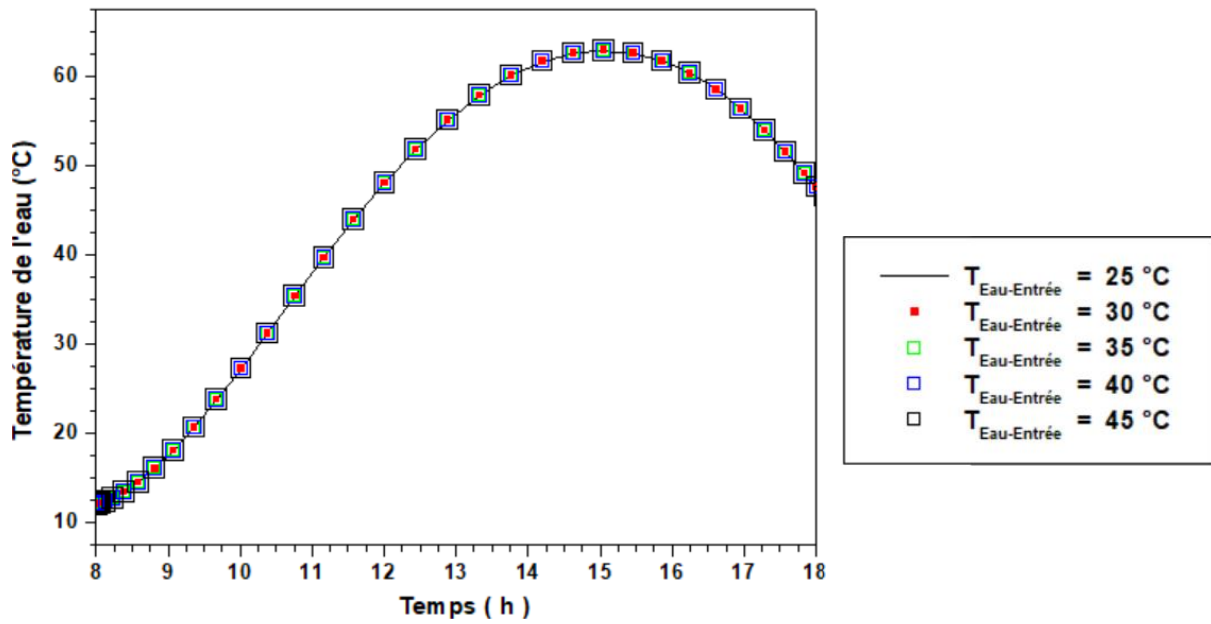


Figure 3.7 : Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.

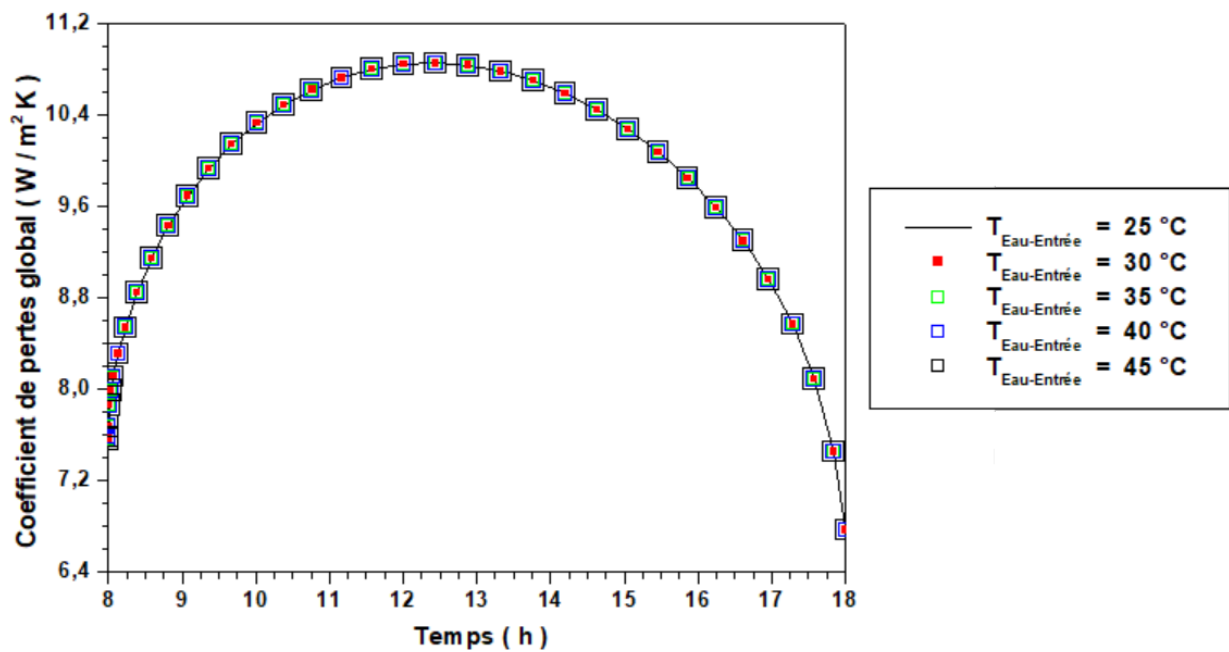


Figure 3.8 : Coefficient de pertes global, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.

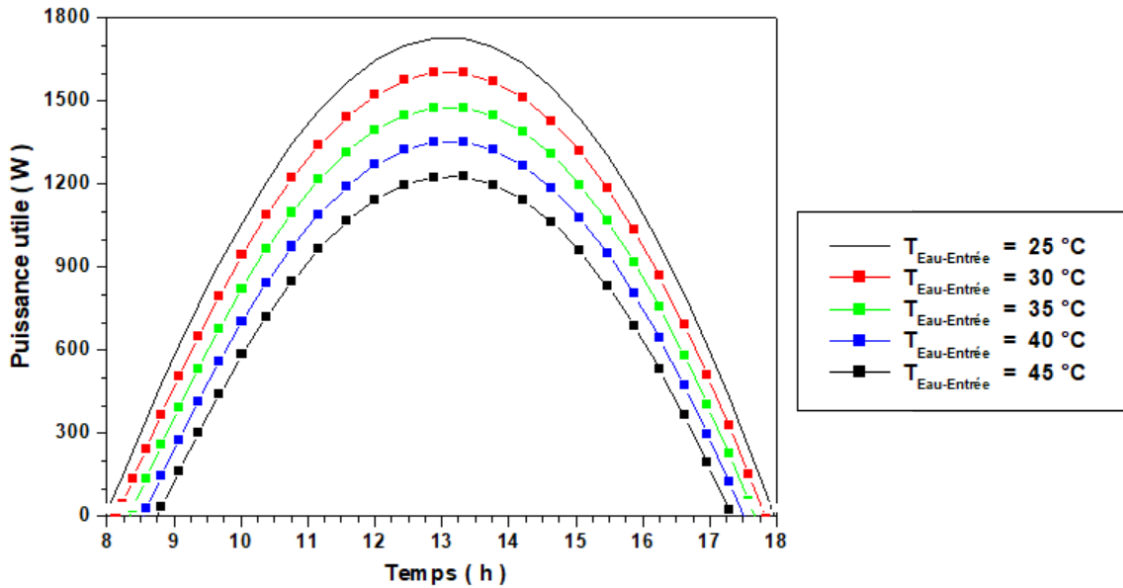


Figure 3.9 : Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.

A l'exception de la puissance utile qui est inversement proportionnelle par rapport à la température de l'eau à l'entrée du capteur solaire, les valeurs des autres profils sont très proches. Cependant, la variation du rendement est globalement linéaire, sa présentation est relative au lissage du premier ordre soit en utilisant la méthode de régression linéaire sur Excel ou en utilisant la fonction "polyfit" sur le logiciel MATLAB. La figure 3.10 montre que le rendement est inversement linéaire par rapport à $(T_{\text{Eau-Entrée}} - T_{\text{Ext}}) / G_{\text{Solaire}}$. Cela signifie que ce chauffe eau solaire atteint plus d'efficacité si la variation entre la température d'entrée de l'eau et la température ambiante extérieure est faible.

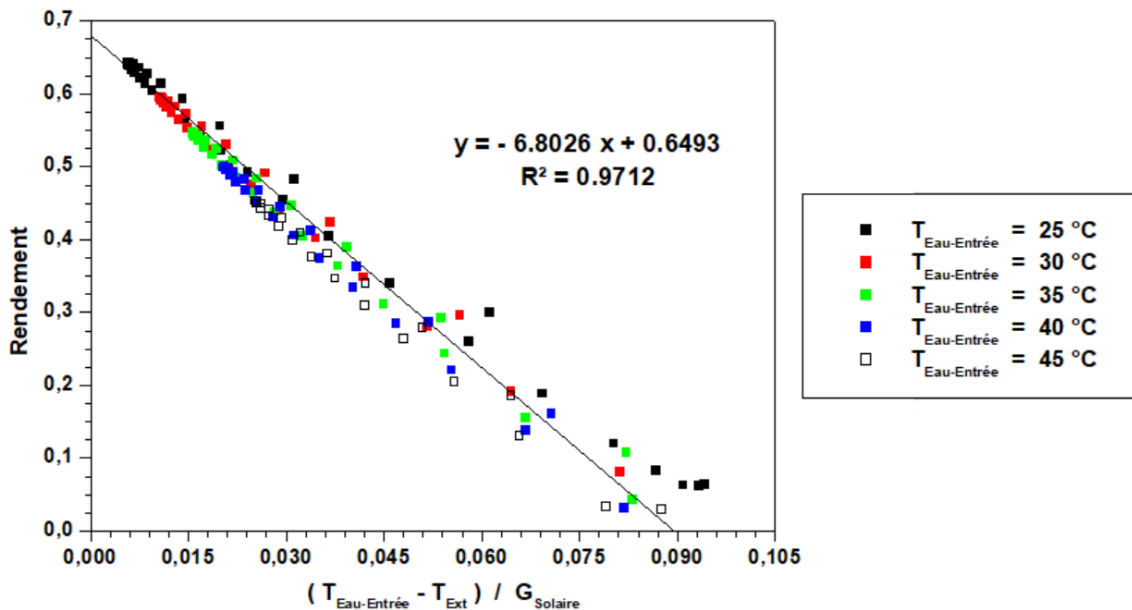


Figure 3.10 : Rendement (l'efficacité) du capteur, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $\beta = 54.27^\circ$.

L'analyse des résultats obtenus prouve qu'au voisinage de la température ambiante, le rendement du capteur solaire plan à eau est intéressant ; estimé aux alentours de 66.80%.

3.5.3.2. Influence de la distance entre la vitre et l'absorbeur

Le rayonnement solaire traverse le vitrage puis frappe l'absorbeur qui s'échauffe et émet, par conséquence, vers l'extérieur un rayonnement thermique dans l'infrarouge. Le couvercle transparent s'oppose au passage de ce type de rayonnement vu que le verre est totalement opaque à ce rayonnement. C'est le phénomène de l'effet de serre en raison de la chaleur qui est donc cernée entre l'absorbeur et la couverture transparente. Les courbes de la figure 3.11 montrent que les températures abouties de l'absorbeur sont plus importantes pour des faibles distances. Cette remarque reste valable même pour les courbes de la figure 3.12 jusqu'à environ 16h 27mn. Au-delà de ce moment, les températures de l'eau deviennent légèrement moins intéressantes pour des faibles distances.

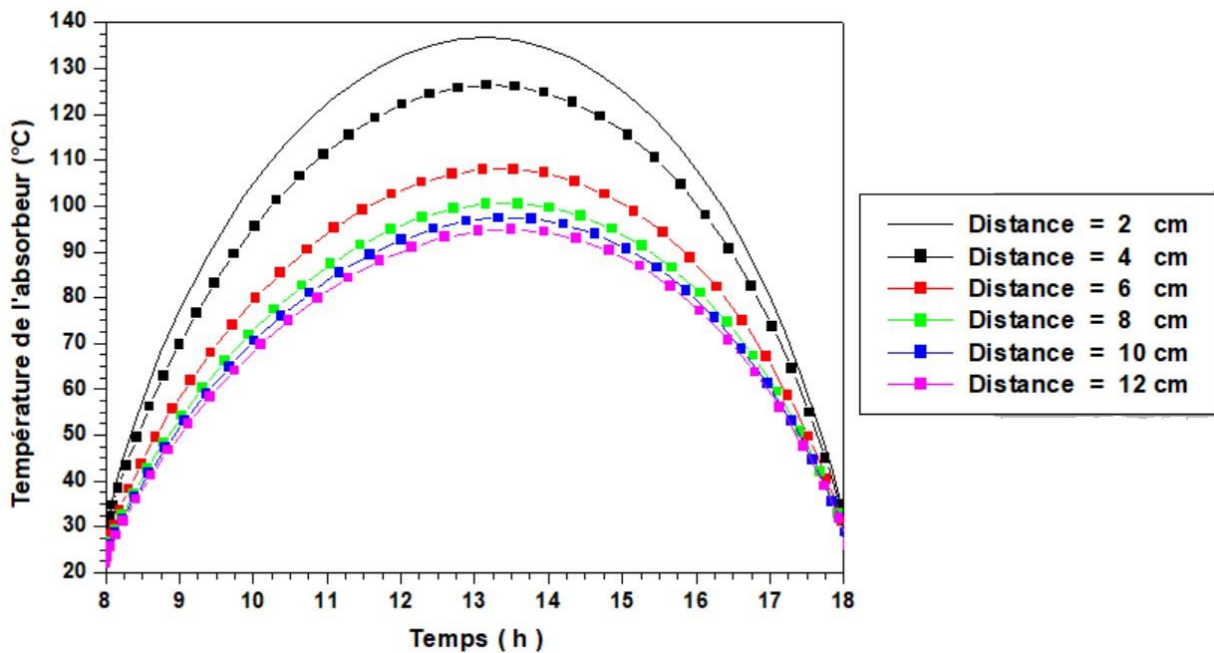


Figure 3.11 : Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.

Ainsi, à mesure que le coefficient de pertes global représenté par la figure 3.13 augmente, les distances croissent également. Par opposition, le gain d'énergie utile est maximal dans ce collecteur solaire lorsque les distances sont alors minimales (figure 3.14).

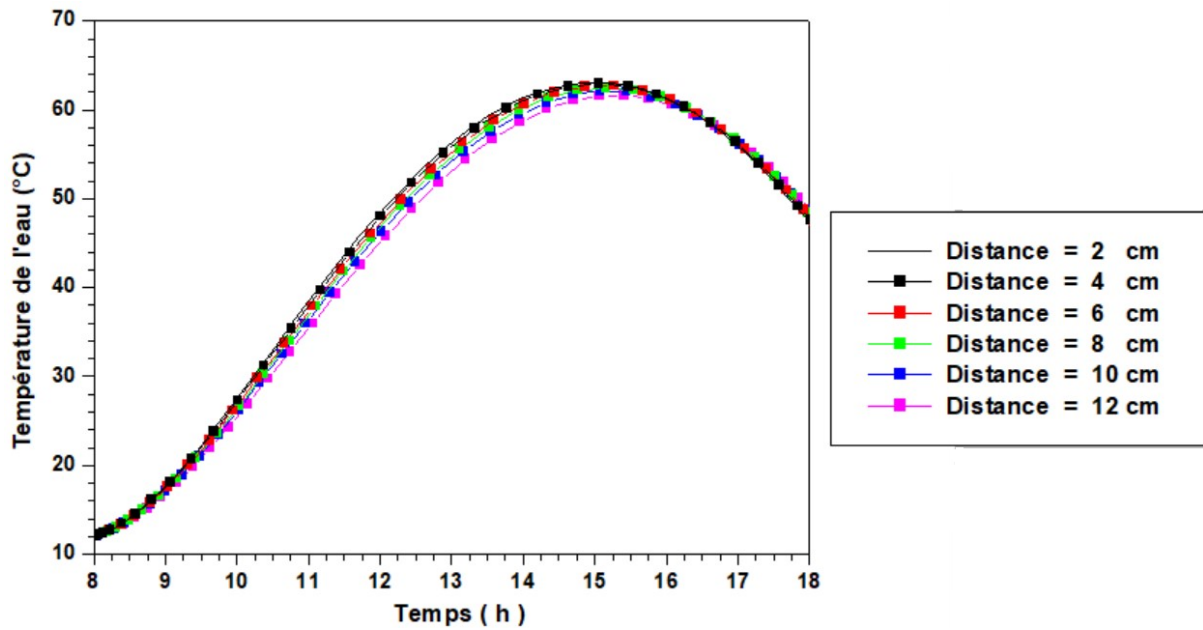


Figure 3.12 : Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.

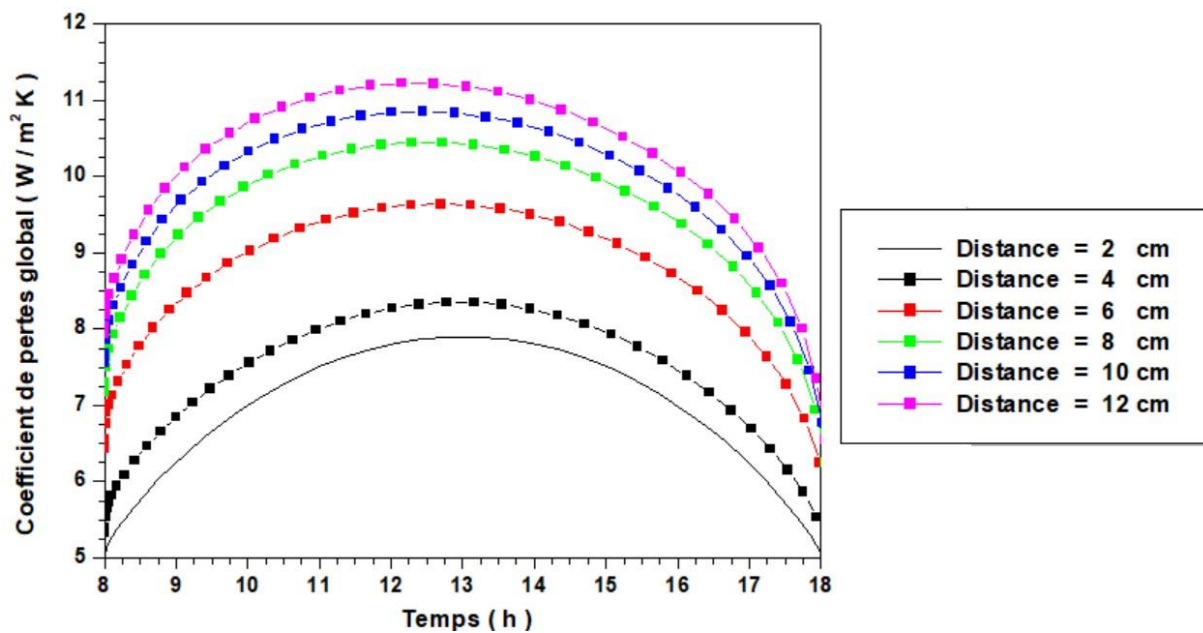


Figure 3.13 : Coefficient de pertes global, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.

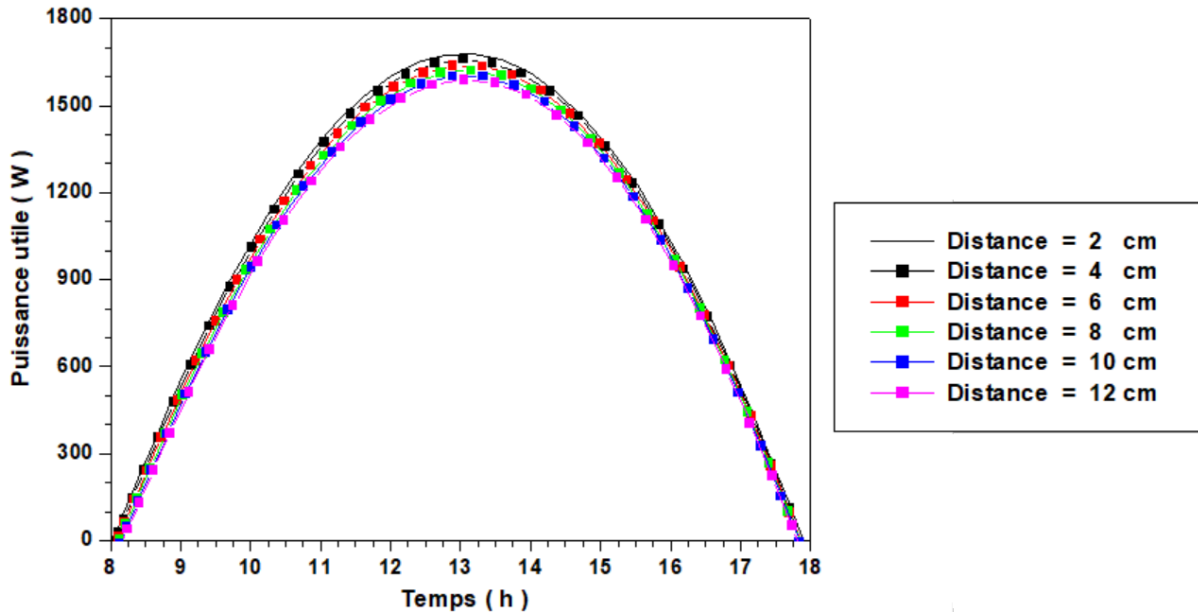


Figure 3.14 : Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.

L'épaisseur de l'espace entre la vitre et la plaque absorbante influe sur les échanges convectifs entre l'absorbeur et la vitre. Globalement, il se situe entre 1.5 cm et 4.5 cm. Pour les espacements très faibles, la convection est supprimée, le transfert de chaleur par conduction et rayonnement sera donc le seul mécanisme dans ce cas. Selon la figure 3.15, la variation linéaire du rendement indique que plus les épaisseurs de l'espace sont basses, plus les rendements seront élevés.

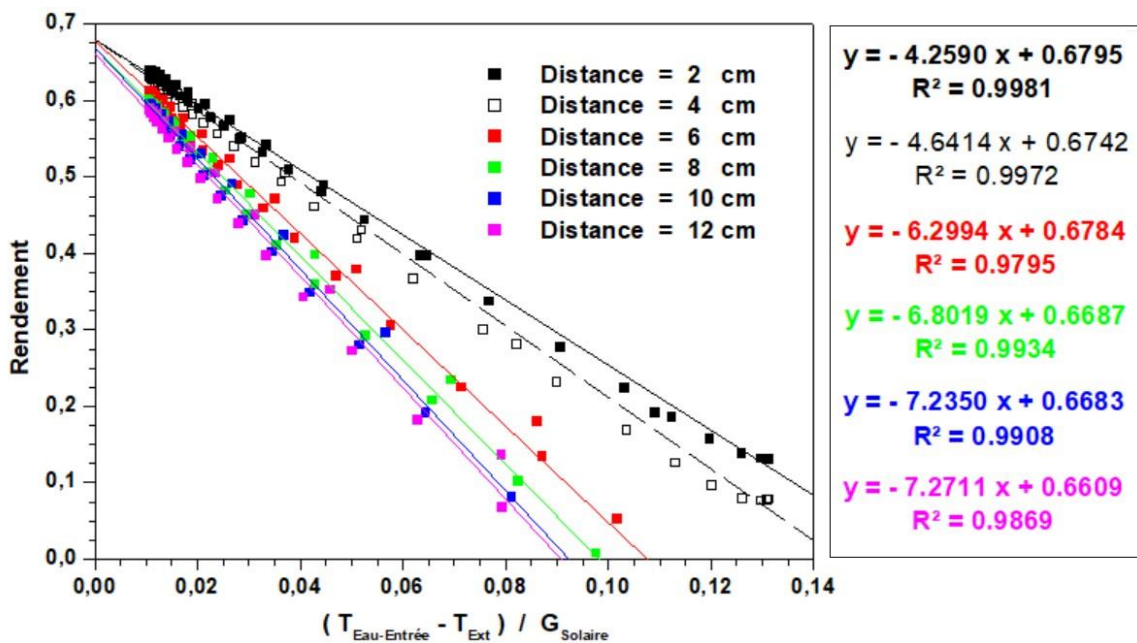


Figure 3.15 : Rendement (l'efficacité) du capteur, cas de l'orientation sud, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 54.27^\circ$.

L'analyse des résultats obtenus montre qu'au voisinage de la température ambiante, l'efficacité thermique du capteur solaire plan à eau est estimée approximativement à 67.95% pour une épaisseur de 2 cm et 66.09% pour une épaisseur de 12 cm.

3.5.3.3. Influence de l'inclinaison

En moyenne, les chauffe-eau solaires peuvent chauffer l'eau à des températures allant d'environ 50 à 70 °C dans des conditions optimales, plus précisément pour des angles optimaux. Toutefois, dans les régions où l'ensoleillement est abondant et où les systèmes sont efficaces, il n'est pas rare que les températures dépassent les 75 °C [51].

L'angle d'inclinaison optimal varie donc en fonction de la latitude du lieu. Il est préférable, en conséquence, d'effectuer un chauffage saisonnier et pourquoi pas mensuel. Par exemple, un chauffage solaire de piscine en été et un chauffage solaire de locaux en hiver nous obligent à ajuster l'angle d'inclinaison conformément au tableau 2.3 du chapitre 2. Pour cet exemple, une comparaison est opérée pour voir l'influence de l'inclinaison sur les performances du capteur solaire.

Les courbes des figures 3.16 et 3.17 montrent que les températures, que ce soit de l'absorbeur ou de l'eau produite, sont plus importantes pour l'angle optimal journalier (plus particulièrement 10 janvier).

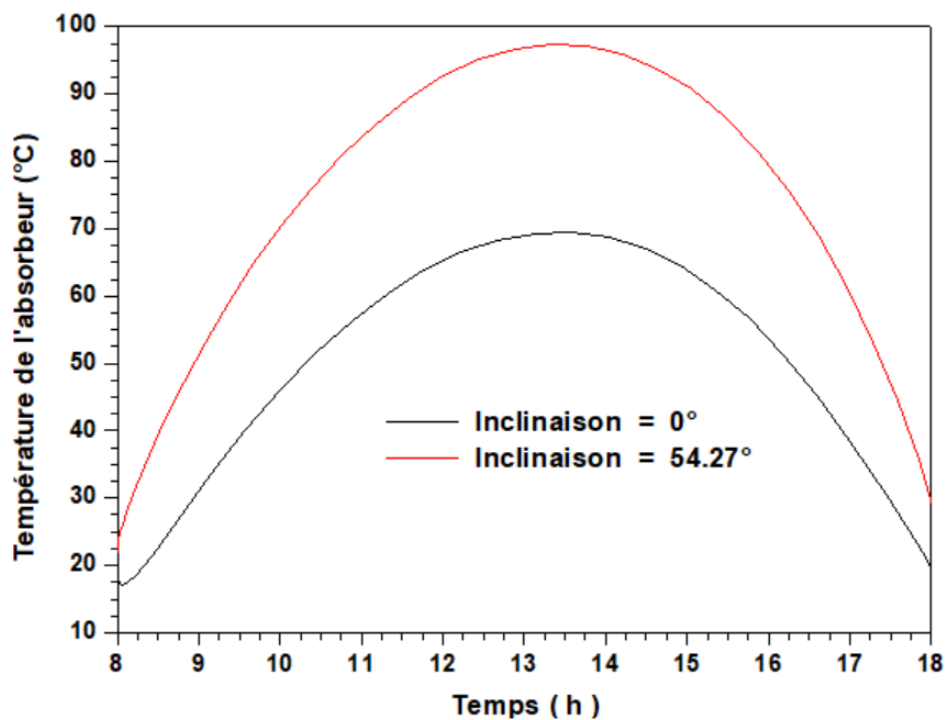


Figure 3.16 : Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C

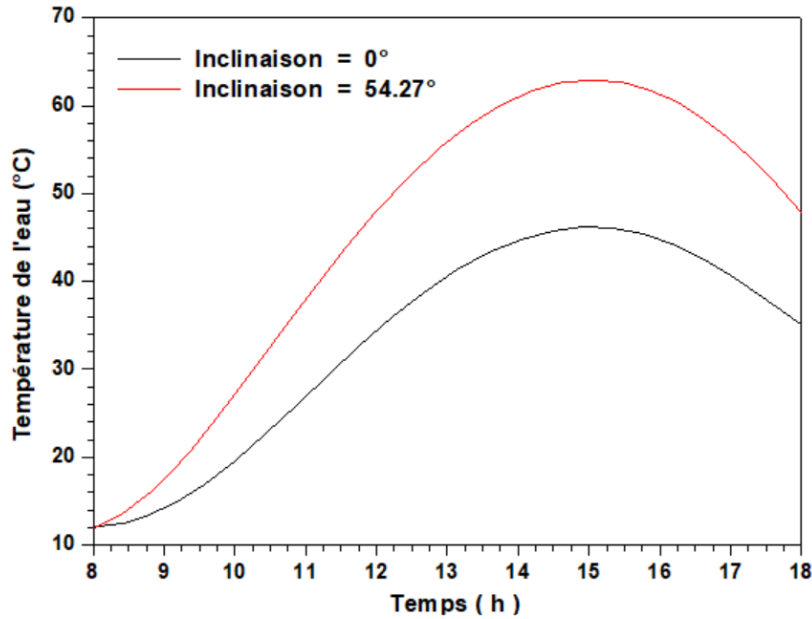


Figure 3.17 : Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C

Mais, la figure 3.18 indique que le coefficient de pertes global pour une inclinaison journalière optimale à 54.27° est, un petit peu, plus élevé avant 9h 42mn et après 16h 14mn.

L'angle d'inclinaison du capteur est, en fait, un élément essentiel pour le bon fonctionnement d'un système de chauffage quelconque. Il va leur permettre d'intercepter les rayons solaires de manière optimale et de renforcer considérablement la puissance thermique fournie à l'eau (figure 3.19).

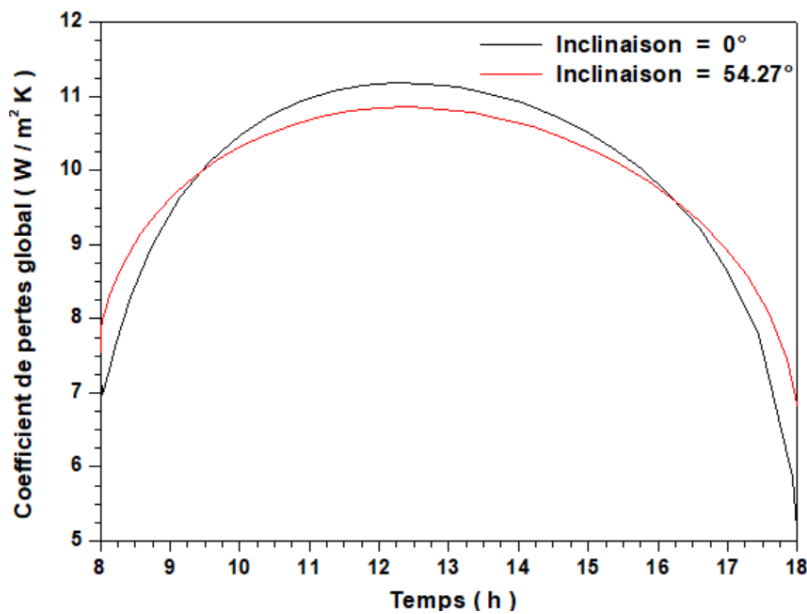


Figure 3.18 : Coefficient de pertes global, 10 Janvier, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C

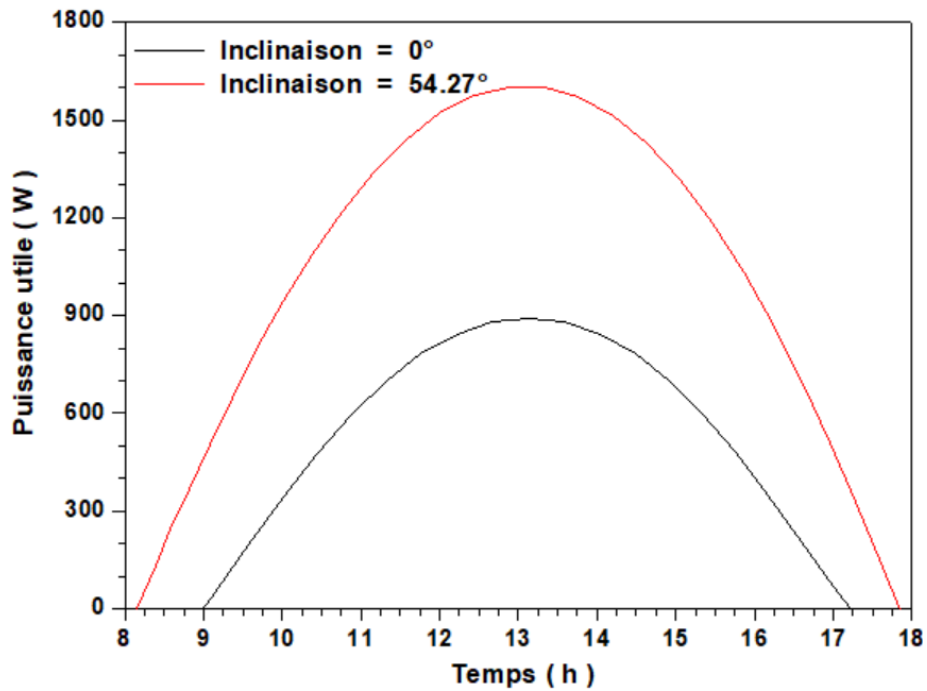


Figure 3.19 : Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C

Le rendement du collecteur solaire est maximal, et plus favorable, pour une inclinaison journalière optimale (figure 3.20).

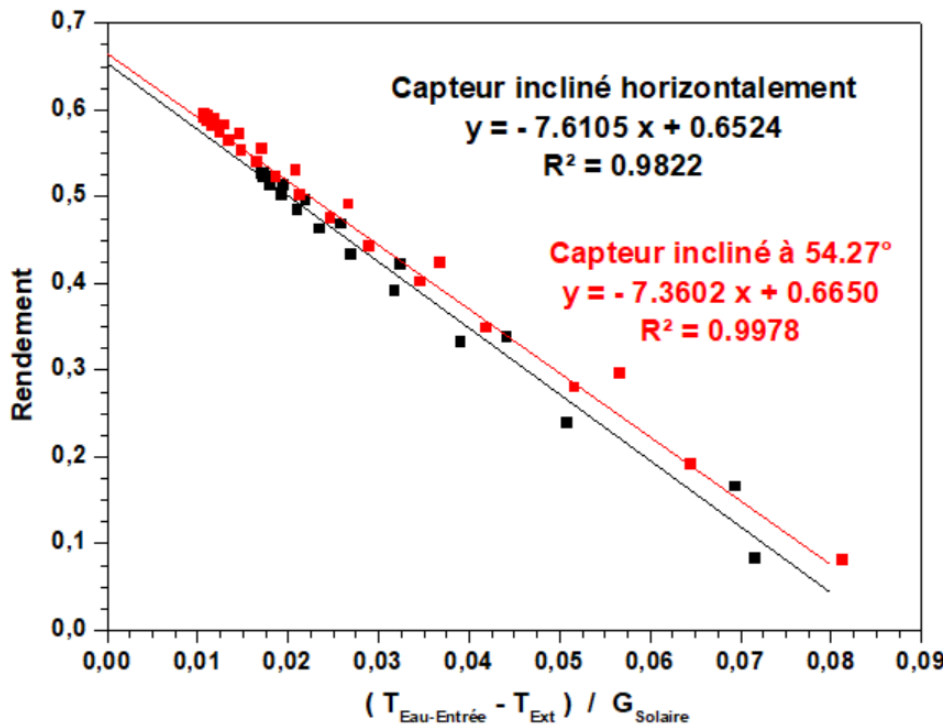


Figure 3.20 : Rendement (l'efficacité) du capteur, cas de l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm et $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C

Il convient alors de faire une moyenne des angles, sur toute une année, une saison, un mois ou une période bien déterminée, afin de déterminer l'inclinaison idéale des capteurs solaires, en prenant en considération les variations de la hauteur du soleil en fonction du lieu où l'on se trouve.

Dans cet exemple, une amélioration du rendement de près de 2.26 % est obtenue. Elle est quantifiée comme une grandeur qui assigne plus précisément des valeurs comprises entre 1.26 % (à des températures d'entrée de l'eau au voisinage de la température ambiante) et 3.26 %.

3.5.3.4. Influence de l'orientation

L'orientation des capteurs doit être adaptée en concordance avec la rotation de notre planète et à la façon dont elle tourne par rapport au soleil. Il est connu que l'orientation optimale d'un capteur solaire est bien le sud, là où le soleil sera à son zénith (la position la plus haute dans le ciel) au milieu de la journée. Mais en fonction de l'impact engendré par les ombres, il est parfois préférable de décaler les capteurs ou de modifier leur orientation de quelques degrés afin de mieux profiter du rayonnement.

La représentation graphique des températures (l'absorbeur et le fluide caloporteur), du coefficient de pertes global, la puissance utile et le rendement sont donnés par les figures 3.21-3.25. Le choix a été porté sur le jour chaud du 20 Juillet.

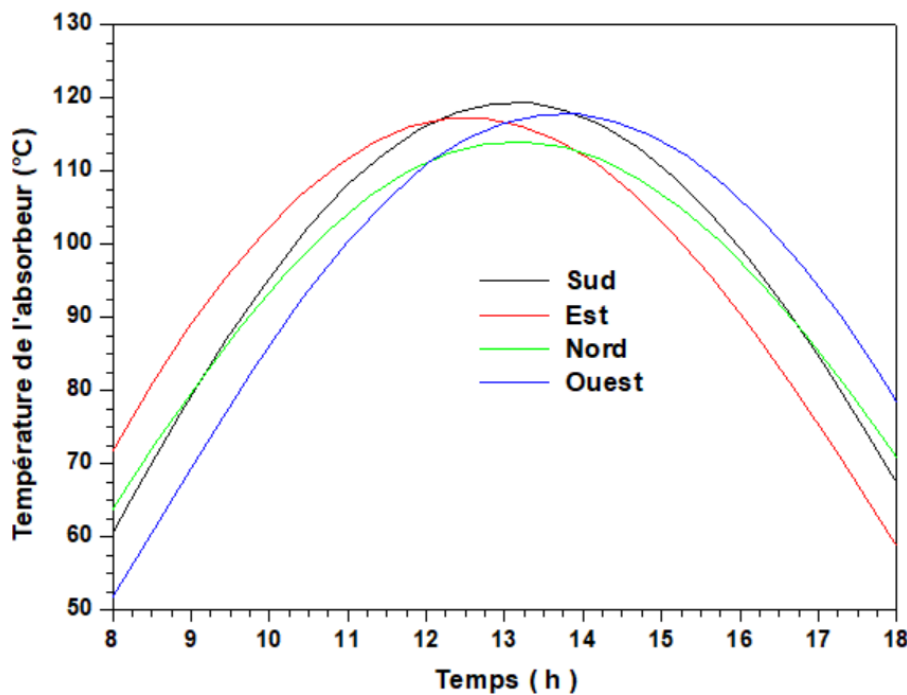


Figure 3.21 : Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

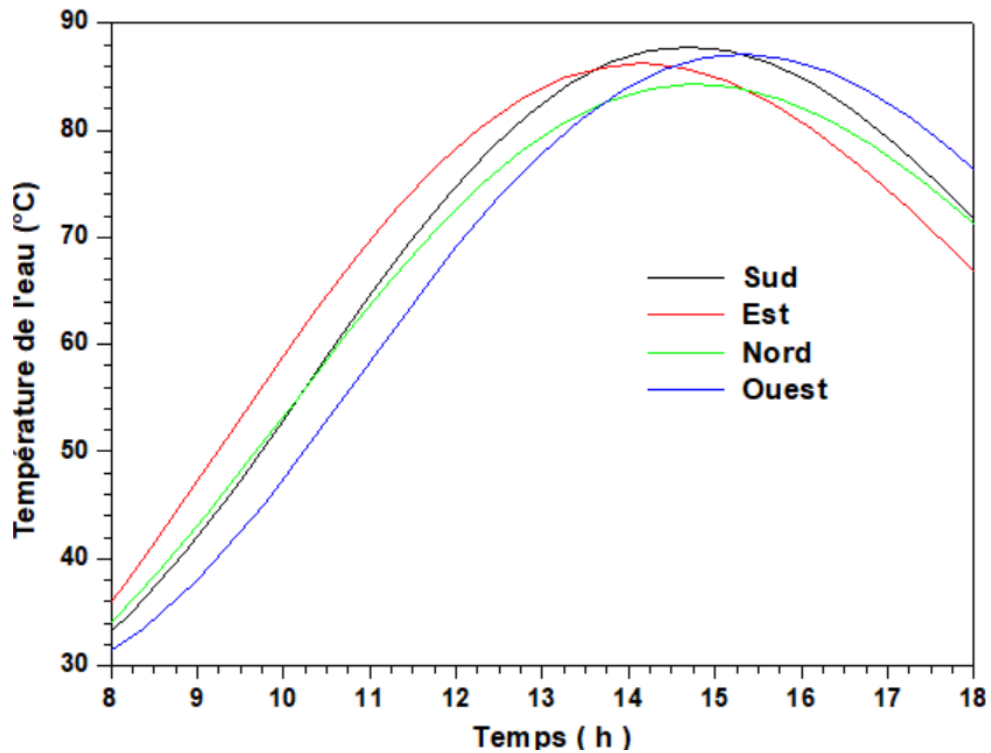


Figure 3.22 : Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

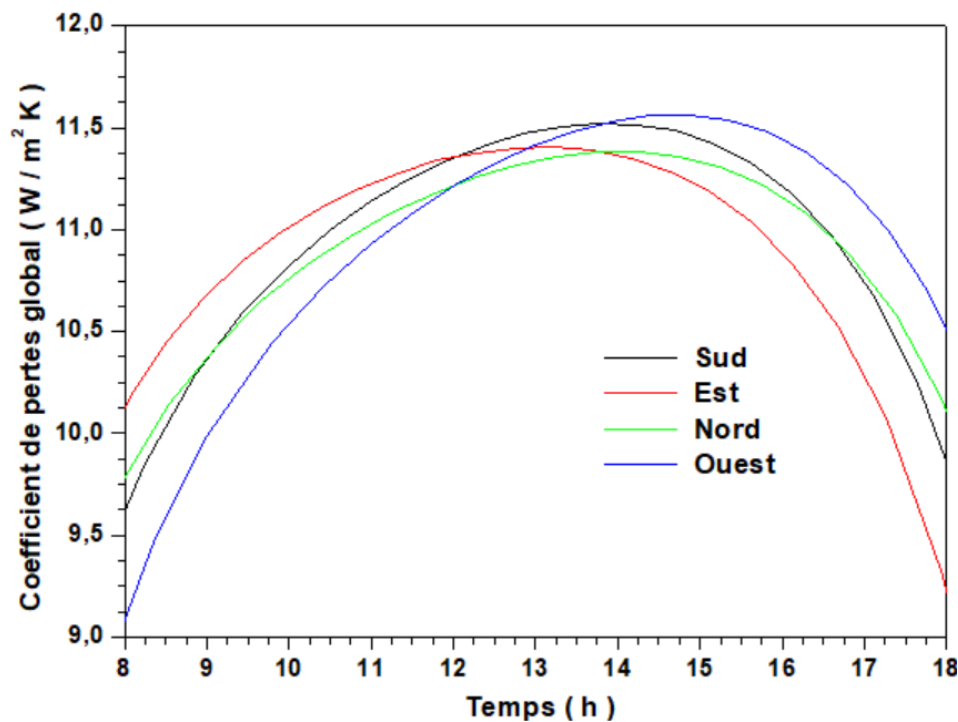


Figure 3.23 : Coefficient de pertes global, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

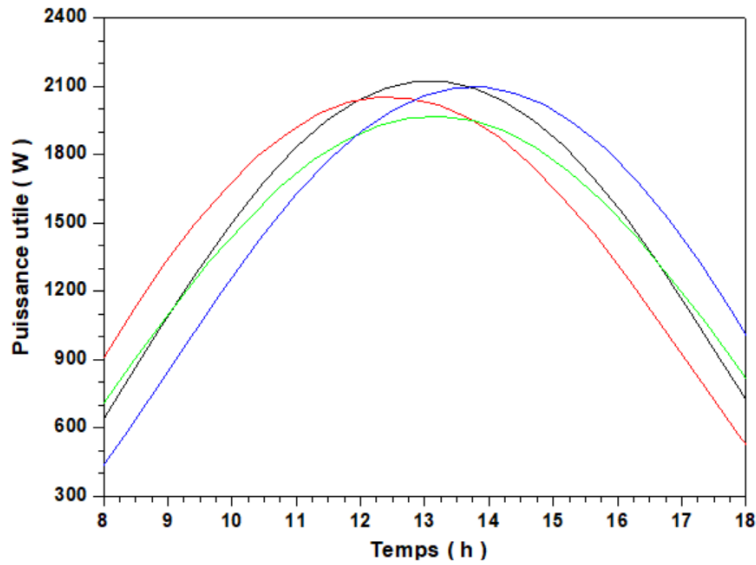


Figure 3.24 : Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

Selon les résultats affichés, tous les profils suivent les profils du flux solaire incident sur le capteur incliné à un angle optimal journalier ($\beta = 11.89^\circ$). La densité solaire reçue dépend de l'angle d'incidence. Plus l'angle d'incidence est faible, plus la surface qui reçoit le rayonnement solaire est faible et plus la puissance solaire reçue est importante.

En termes de température de l'eau produite, il nous apparaît clairement qu'un système amovible est plus efficace. L'orientation Est est la plus favorable jusqu'à 13h 40mn. Au-delà de ce moment, une orientation en plein sud est privilégiée jusqu'à 15h 18mn. Pour ce qui reste, l'Ouest est l'orientation la plus avantageuse.

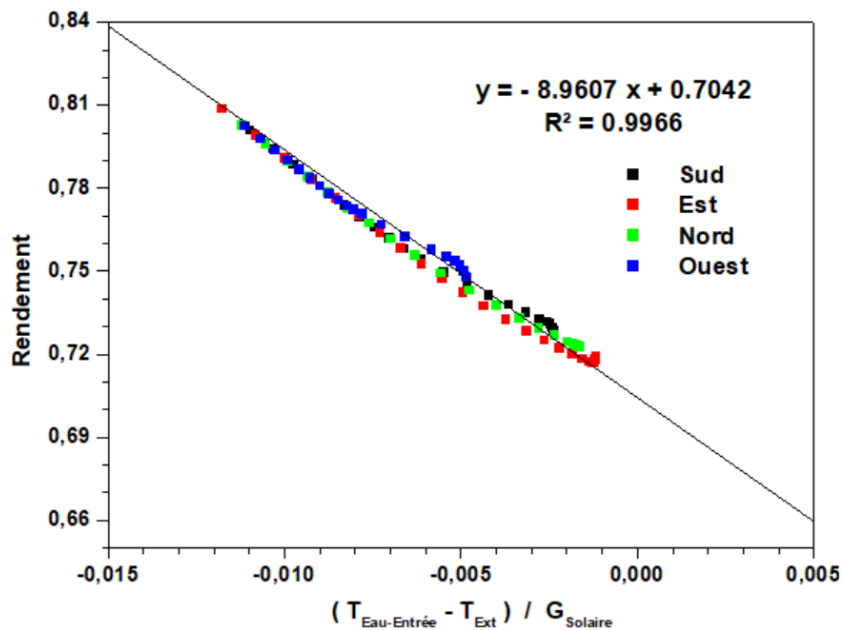


Figure 3.25 : Rendement (l'efficacité) du capteur, 20 juillet, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

Par ailleurs, le rendement est constant vis-à-vis de l'orientation. Ceci explique que l'efficacité énergétique de ce système de chauffage est globalement constante.

3.5.3.5. Influence de la couche sélective

L'absorption du rayonnement solaire reçu dépend de la nature et de la couleur du revêtement. Une haute capacité d'absorption et une faible émissivité améliorent la capacité d'absorption solaire. Une étude comparative a été portée sur l'effet de la couche sélective. Les résultats obtenus sont présentés par les figures 3.26-3.30 ci-dessous. Le choix a été porté sur le jour du 10 Janvier.

L'utilisation d'une couche sélective a permis d'élever au maximum la température de l'absorbeur de 111.74 °C à environ 13h 34mn au 97.43 °C à 13h 20mn, soit une augmentation de 14.31 °C.

De même, la température de l'eau est améliorée de 2.5 °C (de 62.95 °C au 65.45 °C) à 12 temps solaire vrai, le moment où la position du soleil dans le ciel est la plus élevée.

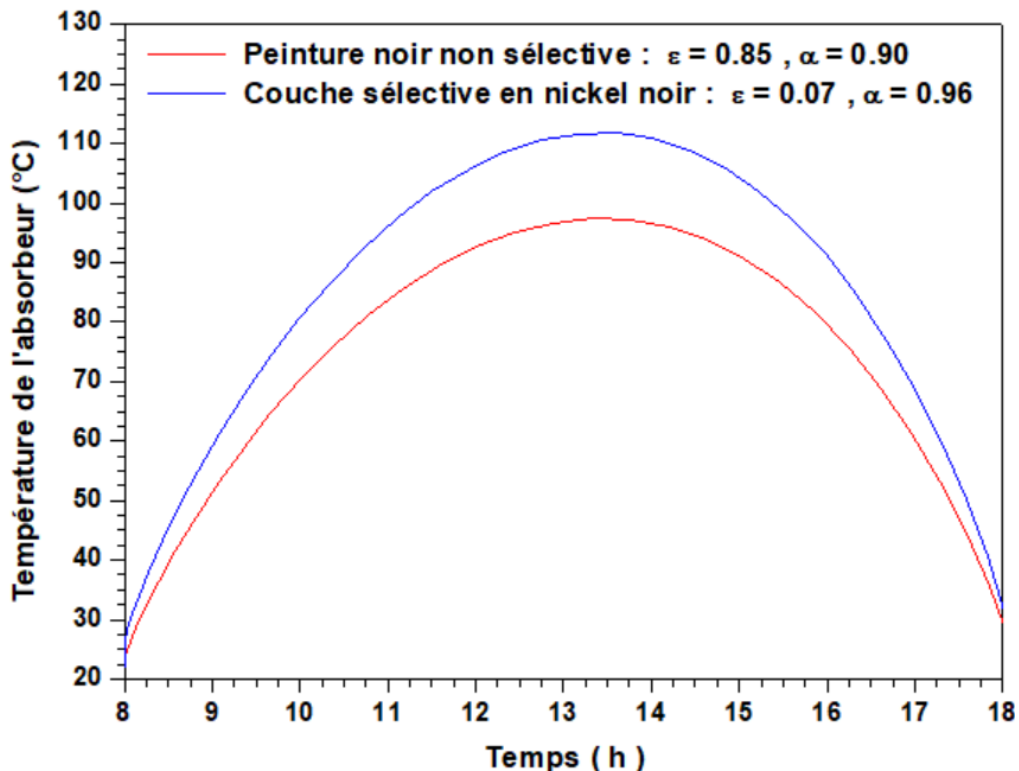


Figure 3.26 : Température instantanée moyenne de l'absorbeur, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

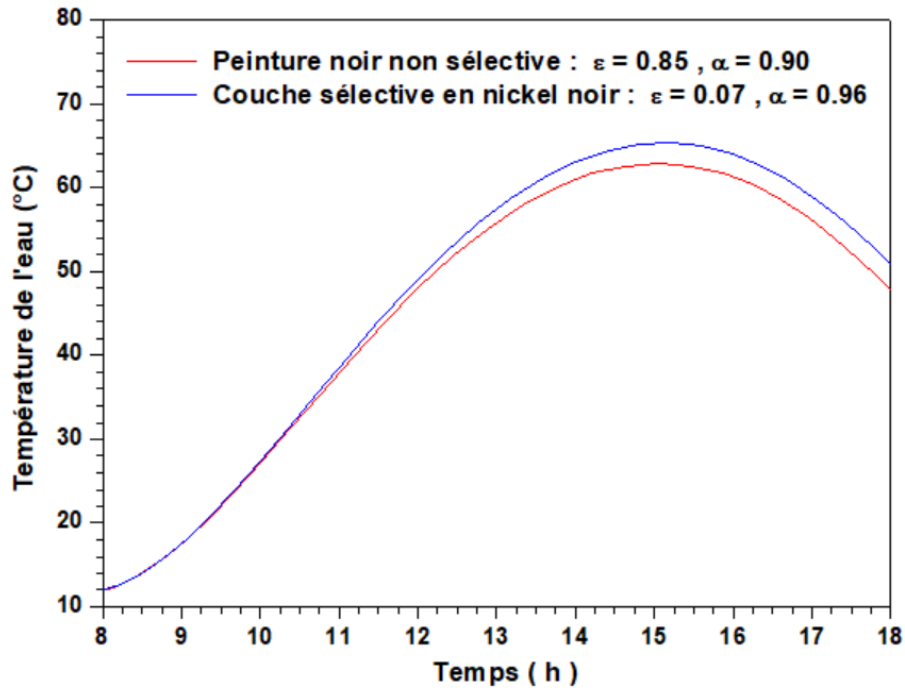


Figure 3.27 : Température instantanée moyenne du fluide caloporteur (l'eau), 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

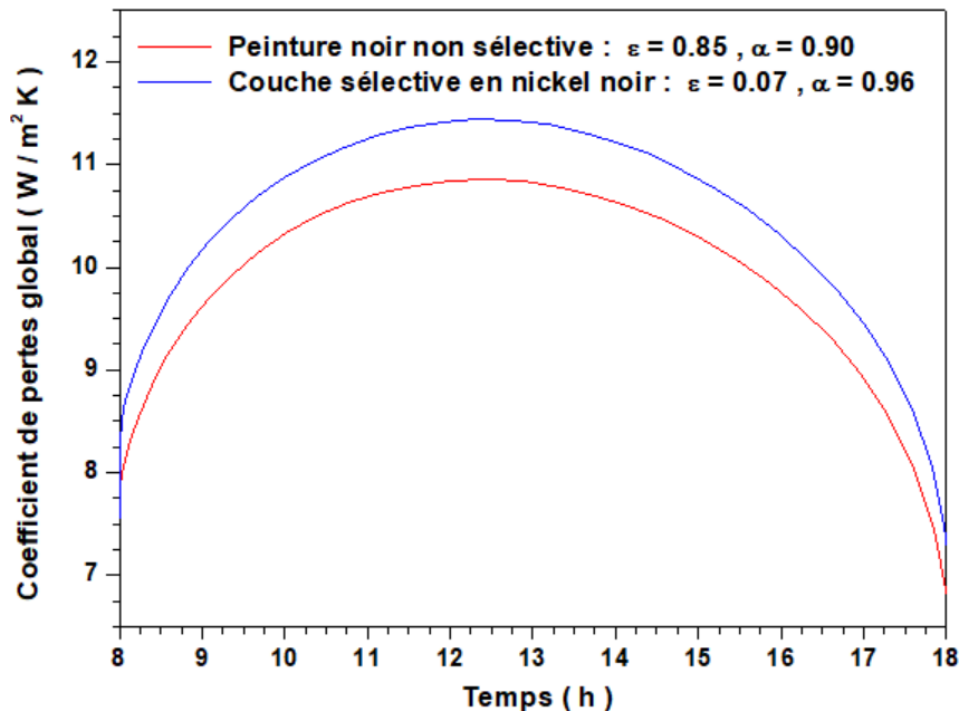


Figure 3.28 : Coefficient de pertes global, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

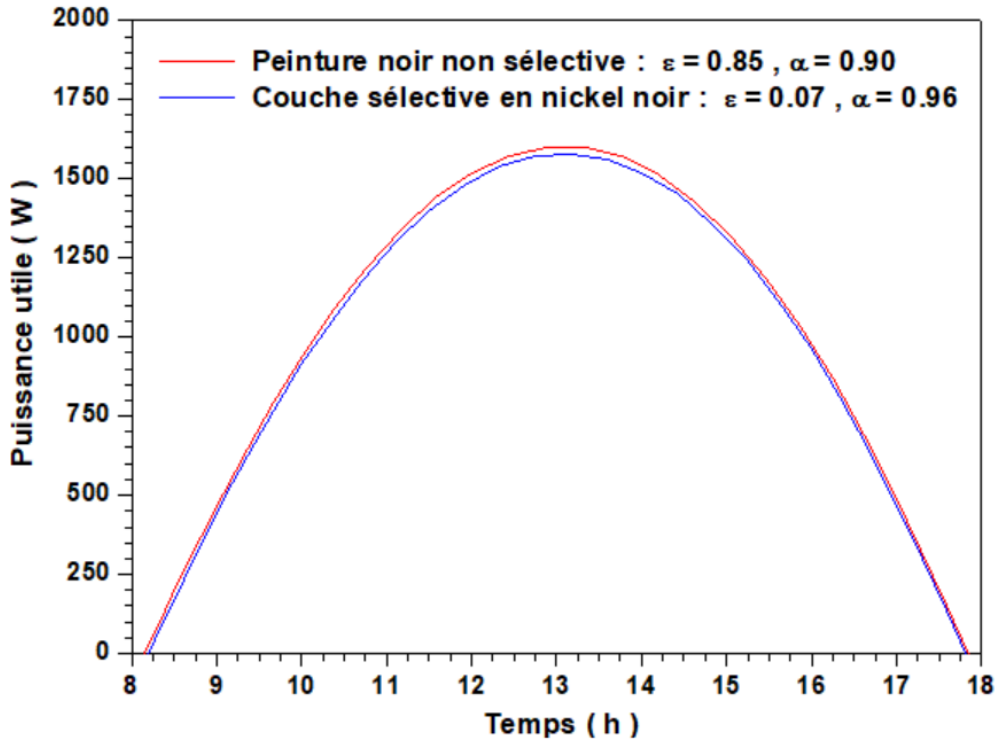


Figure 3.29 : Puissance thermique (utile) fournie à l'eau, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

Une meilleure absorption engendre une faible augmentation de la puissance thermique fournie à l'eau. Elle est de 1580.18 W au 1602.09 W, équivalent à 21.91 W (1.38 %). Le matériau absorbant utilisé sont ainsi sélectionnés pour leur capacité à absorber l'énergie (coefficient d'absorption α élevé) et de réfléchir un minimum d'énergie (coefficient d'émissivité de chaleur ε faible).

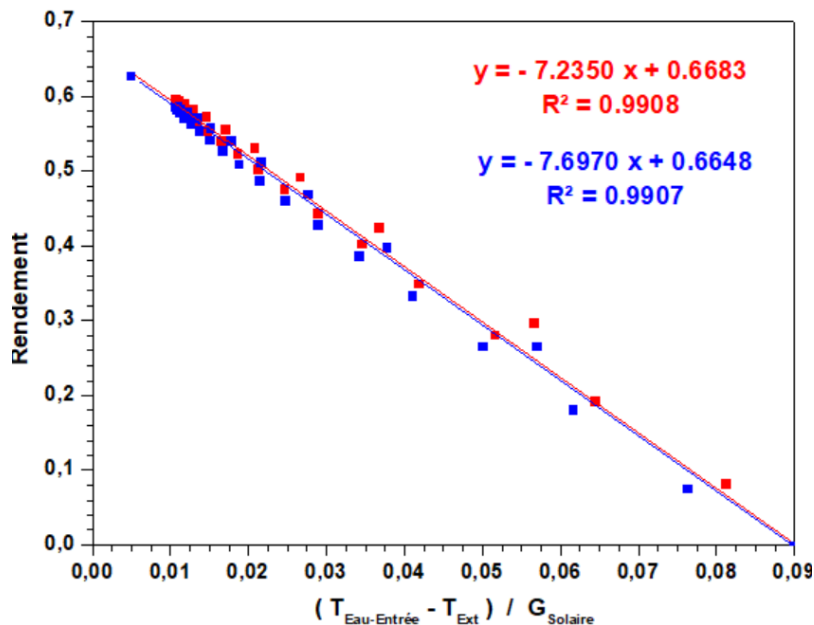


Figure 3.25 : Rendement (l'efficacité) du capteur, 10 Janvier, l'orientation sud, $q_v = 120$ Litre/Heure, $b = 10$ cm, $T_{Eau-Entrée} = 30$ °C et $\beta = 11.89^\circ$.

Le dépôt de la couche sélective améliore le rendement jusqu'à approximativement 3 % et en moyenne 2.58 %. Le revêtement présente une structure particulière qui optimise la captation du rayonnement solaire tout en minimisant la réémission dans le champ des longueurs d'onde du rayonnement thermique, ce qui diminue les déperditions thermiques de chaleur (rayonnement IR).

3.6. Conclusion

Pour assurer une grande part des besoins énergétique destinée au chauffage d'eau, une bonne optimisation des principaux paramètres liés au capteur solaire à eau est requise. À cet égard, nous avons mis en évidence l'effet des conditions météorologiques et l'influence des paramètres de fonctionnement.

Si la température de l'eau froide à l'entrée du capteur solaire est au voisinage de la température ambiante, l'efficacité du capteur solaire plan à eau sera meilleure, elle avoisine les 67%. Elle peut atteindre les 68% pour des faibles distances (proche de 2 cm) entre la vitre et l'absorbeur. Cette efficacité peut être maximale et plus favorable pour une inclinaison journalière optimale. Il est possible de l'avoir en faisant une moyenne des angles optimaux, sur toute une année, une saison, un mois ou une période bien déterminée. Encore plus, un système amovible est plus efficace et l'adoption d'une couche sélective améliore le rendement à une moyenne de 2.58 %.

Conclusion générale

Dans ces travaux, nous avons pu apporter une revue succincte sur les chauffe - eaux solaires qui sont considérés comme étant les équipements les plus utilisés dans le domaine de l'énergie solaire.

Nous avons, ensuite, s'intéressé à l'optimisation de l'orientation et l'inclinaison en vue d'assurer une production maximale de l'eau chaude. L'intégration d'un suiveur solaire engendre systématiquement une augmentation du coût total. C'est pourquoi cette étude propose une méthode moins coûteuse, avec des capteurs fixes et inclinés selon les mois de l'année. Nous avons conclu que, pour le site de Ghardaïa, l'angle d'inclinaison optimal varie entre 9.73° (22 juin) et 55.05° (22 décembre) tout au long de l'année. En hiver (décembre, janvier et février), l'inclinaison doit être de 50.82° , au printemps (mars, avril et mai) de 23.84° , en été (juin, juillet et août) de 13.74° et en automne (septembre, octobre et novembre) de 40.09° . Avec une orientation sud et une inclinaison optimale mensuelle, il est possible d'atteindre une irradiation journalière de plus de 8 kWh/m^2 si le ciel est clair, ce qui est très propice à ce type d'applications.

Nous avons, finalement, mis en évidence l'effet des paramètres de fonctionnement et les conditions météorologiques en étudiant les performances d'une installation solaire de production d'eau chaude. La modélisation numérique nous a permis de simuler le comportement du capteur solaire dans différents cas de figures. L'installation étudiée est un système à circulation forcée qui est doté d'un capteur plan vitré de 2.31 m^2 de surface. L'efficacité du capteur solaire plan à eau sera améliorée à presque 67% à une température de l'eau froide de l'alimentation au voisinage de la température ambiante. Elle peut atteindre les 68% pour des faibles distances (proche de 2 cm) entre la vitre et l'absorbeur. Cette efficacité peut être maximale et plus favorable pour une inclinaison journalière optimale. Il est possible de l'avoir en faisant une moyenne des angles optimaux, sur toute une année, une saison, un mois ou une période bien déterminée. Encore plus, l'adoption d'une couche sélective améliore le rendement à une moyenne de 2.58 %.

Références bibliographiques

1. L. Evangelisti, R. De Lieto Vollaro, F. Asdrubali, Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 114, 2019, 109318.
2. Marc Seguin, les capteurs solaires thermiques. <https://www.nouvenergie.fr/formation/solaire-1/les-capteurs-thermiques/> Consulté en Juillet 2024.
3. S.B. Kedare, N.B. Desai, Solar thermal process heat, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 2017, 367-376.
4. Jeffrey R.S. Brownson, Chapter 12 - Systems logic of devices: patterns, *Solar Energy Conversion Systems*, 2014, 307-318.
5. S.C. Bhatia, Solar thermal energy, *Advanced Renewable Energy Systems*, 2014, 94-143.
6. S. Di Fraia, R.D. Figaj, M. Filipowicz, L. Vanoli, Chapter 6 - Solar-based systems, *Polygeneration Systems Design, Processes and Technologies*, 2022, 193-237.
7. A. Eggers-lura, Chapter III - State of the art, *Solar Energy in Developing Countries, An Overview and Buyers' Guide for Solar Scientists and Engineers*, 1979, 14-56.
8. C. Zhu, X. Dong, S. Yan, Y. Cui, Q. Luo, Air-type vacuum-tube solar collector design and heat collection performance test, *Energies* 2022, 15, 5679..
9. R. Abdo, How do vacuum tubes collectors work ? So how do Vacuum Tube Solar Water Heaters work ? 2020 <https://hydrosolar.ca/blogs/news/how-do-vacuum-tubes-collector-work>. Consulté en Juillet 2024.
10. S.K. Pathak, V.V. Tyagi, K. Chopra, A. Sari, Thermal performance and design analysis of U-tube based vacuum tube solar collectors with and without phase change material for constant hot water generation, *Journal of Energy Storage*, 66, 2023, 107352.
11. R. Külçü, Design of serial connected vacuum tube solar air collector, *European Scientific Journal*, 2017, Special edition ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
12. Green Revolution, Solar Pool Heating, <https://www.greenrevolutionltd.com/solar-pool-heating/>. Consulté en Juillet 2024.
13. G.L. Harding, Yin Zhiqiang, Thermosiphon circulation in solar water heaters incorporating evacuated tubular collectors and a novel water-in-glass manifold, *Solar Energy*, 34(1), 1985, 13-18.
14. Jalaluddin, R. Tarakka, M. Syahid, M.H. Basri, M.A.I. Rahmadhani, Performance investigation of solar water heating system using flat-plate absorber integrated with thermal storage, *Cleaner Engineering and Technology*, 17, 2023, 100696.
15. Comment fonctionne un chauffe-eau solaire ? <https://www.kelwatt.fr/renovation-energetique/chauffe-eau/solaire>. Consulté en Juillet 2024.

16. R. Bharathiraja, T. Ramkumar, L. Karthick, M. Mohanraj, Performance investigation on flat plate solar water collector using a hybrid nano-enhanced phase change material (PCM), *Journal of Energy Storage*, 86, Part A, 2024, 111163.
17. A.F. Ashour, A.T. El-Awady, M.A. Tawfik, Numerical investigation on the thermal performance of a flat plate solar collector using ZnO & CuO water nanofluids under Egyptian weathering conditions, *Energy*, 240, 2022, 122743.
18. El-Sayed R. Negeed, M. Alhazmy, A.Y.F. Bokhary, H. Abulhair, M.A. Almas, H.S. Hedia, Numerical simulation of flat plate solar collector equipped with a turbulator containing water/copper-graphene hybrid nanofluid utilizing a two-phase model, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 156, 2023, 90-113.
19. B. Darbari, S. Rashidi, Thermal efficiency of flat plate thermosyphon solar water heater with nanofluids, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 128, 2021, 276-287.
20. Rayonnement solaire : [https://lenergie-solaire.net/Définitions/Rayonnement solaire](https://lenergie-solaire.net/Définitions/Rayonnement_solaire). Consulté en Juillet 2024.
21. ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Eau chaude solaire, Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives, France, Avril 2002.
22. M. Belhadj, Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome, Magister en Microélectronique Photovoltaïque, Universitaire de Bechar, 2008, Algérie.
23. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Doctorat en Physique Électronique et Modélisation, Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2009, Algérie.
24. M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, Office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375, 1987.
25. F.M. Abreu Edgar, P. Canhoto, J. Costa Maria, Direct Normal Irradiance and circumsolar radiation: modelling, measurement and impact on Concentrating Solar Power, *Jornadas ICT 2017*, 25-27 Junho 2017, Braga, Portugal.
26. M.M. El-Kassaby, Monthly and daily optimum tilt angle for south facing solar collectors; theoretical model, experimental and empirical correlations, *Solar & Wind Technology*, (5)6, 1988, 589-596.
27. T. Cholewa, A. Siuta-Olcha, R. Anasiewicz, On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings - Long term field research, *Journal of Cleaner Production*, 217, 2019, 194-203.
28. A. Serban, N. Barbuta-Misu, N. Ciucescu, S. Paraschiv, S. Paraschiv, Economic and environmental analysis of investing in solar water heating systems, *Sustainability*, 8, 2016, 1286.
29. A. Gastli, Y. Charabi, Solar water heating initiative in Oman energy saving and carbon credits, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, 1851-1856.

30. S. Singh, A. Anand, A. Shukla, A. Sharma, Environmental, technical and financial feasibility study of domestic solar water heating system in India, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 2021, 100965.
31. J.J. Bukoski, P. Chaiwiwatworakul, S.H. Gheewala, Energy savings versus costs of implementation for demand side management strategies within an energy-efficient tropical residence, *Energy Efficiency*, 9, 2016, 473-485.
32. E. Šahic, A. Husika, N. Zecevic, E. Džaferovic, Techno-economic analysis of solar energy use for sanitary water heating in institute "Drin Fojnica", In *Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium, Mostar, Bosnia and Herzegovina, 21–24 October 2020*; Katalinic, B., Ed.; DAAAM International: Vienna, Austria, 2020; pp. 542–549.
33. M.L. Moussi, Etude analytique et experimentale d'un capteur solaire plan, Ingénieur d'État en Génie Mécanique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP) d'Alger, Année universitaire 2009/2010.
34. M.S. Zineddine, H. Bouchena, Etude théorique d'un capteur solaire plan à air, Master en Physique Energétique et Energies Renouvelables, Université Ahmed Draia, Adrar, Année universitaire 2020/2021.
35. M. Mohamed El Haouari, Caractéristiques techniques des Chauffe-eau solaires, Centre de Développement des Energies Renouvelables.
<https://slideplayer.fr/slide/2769254/> Consulté en Juillet 2024.
36. T. Lecompte, A. Hellouin de Menibus, ACV et matériaux biosourcés : Comment évaluer l'impact des bâtiments sur le réchauffement climatique ? Webinar GDR MBS, 16 juin 2020.
37. Arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000234156#LEGIARTI000020397570>. Consulté en Juillet 2024.
38. Glossaire de la laine de minérale : laine de roche.
<https://www.filmm.org/glossaire/la-laine-de-roche>. Consulté en Juillet 2024.
39. Association pour la CERTification des Matériaux Isolants Référentiels ACERMI.
<https://www.acermi.com/fr/documents-reference/referentiels-acermi/#>. Consulté en Juillet 2024.
40. U. Jarfelt, O. Ramnäs, Thermal conductivity of polyurethane foam - best performance, 10th International Symposium on District Heating and Cooling Sektion 6 a: Heat distribution – pipe properties, 3-5 septembre 2006.
41. Caractéristiques des isolants
<https://www.alec-montpellier.org/wp-content/uploads/2020/07/Comparatif-des-isolants-ALEC-08.01.2019.pdf/#>. Consulté en Juillet 2024.
42. Isoliège, l'isolation parfaite pour tout système.
<https://ecobati.be/documents/fiche-techniques/liege/ft-ecobati-isoliege-fr.pdf>. Consulté en Juillet 2024.

43. M. Reza Nejati, V. Fathollahi, M. Khaladji Asadi, Computer simulation of the optical properties of high-temperature cermet solar selective coatings, *Solar Energy*, Vol. 78, issue 2, 2005, pp 235-241.
44. J.H. Wattmuf, W.W.S. Charters, D. Proctor, Solar and wind induced external coefficients for solar collectors, *Complex 2*, 1977, 56.
45. V.B. Sharma, S.C. Mullick, Estimation of heat-transfer coefficients, the upward heat flow and evaporation in a solar still, *ASME Journal of Solar Engineering*, 113, 1991.
46. Y. Jannot, *Transferts thermiques*, 2003.
47. A. Azzaoui, R.A. Mehaya, Adaptation et rentabilité d'une installation photovoltaïque autonome, Master en Énergie Renouvelable option : Électrotechnique, Département d'Automatique et Électromécanique, Université de Ghardaïa, Juin 2024.
48. Algeria relief location map,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Algeria_relief_location_map.jpg?uselang=fr. Consulté en Juillet 2024.
49. Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour Ghardaïa
https://fr.weatherspark.com/y/147956/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Ghardaia-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e#google_vignette. Consulté en Juillet 2024.
50. N Boudoumi, C Bousalem, Conception et réalisation expérimentale d'une installation solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire, Ingénieur d'État en Génie Mécanique, École Nationale Polytechnique El Harrach 16200 Alger, Algérie, 2015.
51. S.M.A. Bekkouche, R. Djefal, M.K. Cherier, M. Hamdani, Z. Younsi, S. Al-Saadi, M. Zaiani, Experimental performance and cost-effectiveness of a combined heating system under Saharan climate, *Buildings* 2023, 13, 635.

Résumé

Dans ce travail, nous étudions l'utilisation de l'énergie solaire dans les capteurs solaires plans en vue de produire de l'eau chaude. L'objectif est de simuler un capteur solaire plan à eau appliqué au site de Ghardaïa. Le programme nous a permis de faire un diagnostic adéquat des paramètres d'optimisation. À cet effet, un système d'équations différentielles ordinaires non-linéaires a été développé pour l'étude des paramètres d'optimisation. Le rendement du capteur peut être amélioré à presque 67% à une température de l'eau de l'alimentation au voisinage de la température ambiante. Il peut atteindre les 68% pour des faibles distances entre la vitre et l'absorbeur. Il peut être aussi maximal en faisant une moyenne des angles optimaux, sur toute une année, une saison, un mois ou une période bien déterminée. Encore plus, l'adoption d'une couche sélective améliore le rendement à une moyenne de 2.58 %.

Mots clés

Chauffe-eau solaire, Pertes globales, Puissance thermique utile, Couche sélective, Orientation, Inclinaison optimale, Rendement.

Abstract

In this work, the use of solar energy in flat-plate solar collectors to produce hot water was studied. The aim is to simulate a flat-plate solar water collector applied to the Ghardaïa site. The simulation program enabled us to make a proper diagnosis of the optimization parameters. To this end, a system of nonlinear ordinary differential equations was developed to study the optimization parameters. The collector's efficiency can be improved to almost 67% at a supply water temperature close to the ambient temperature. It can reach 68% for small distances between the glass and the absorber. It can also be maximized by averaging the optimum angles over an entire year, season, month or specific period. What's more, the adoption of a selective coating improves yield to an average of 2.58%.

Key words

Solar water heater, Global heat losses, Useful thermal power, Selective coating, Orientation, Optimal inclination, Efficiency.

المخلص

في هذا العمل، ندرس استخدام الطاقة الشمسية في المجمعات الشمسية ذات الألواح المسطحة لإنتاج الماء الساخن. الهدف من ذلك هو محاكاة لاقط شمسي مسطح يستعمل لتسخين الماء مركب في غرداية. مكّنا برنامج المحاكاة من إجراء تشخيص مناسب لمعايير التحسين. وتحقيقاً لهذه الغاية، تم تطوير نظام من المعادلات التفاضلية العادية غير الخطية لدراسة معاملات التحسين. يمكن تحسين كفاءة المجمّع إلى ما يقرب من 67% عند درجة حرارة مياه الإمداد القريبة من درجة الحرارة المحيطة. يمكن أن تصل إلى 68% للمسافات الصغيرة بين الزجاج والصفحة الماصة. ويمكن أيضاً تعظيمها من خلال حساب متوسط الزوايا المثلى على مدار عام أو موسم أو شهر أو فترة محددة. علاوة على ذلك، فإن اعتماد طلاء انتقائي يحسن الكفاءة إلى متوسط 2.58%.

الكلمات المفتاحية

سخان المياه بالطاقة الشمسية، إجمالي خسائر الحرارة، الطاقة الحرارية المفيدة، الطبقة الانتقائية، الاتجاه، الميل الأمثل، الكفاءة.



غرداية في: 2024/09/.....
9 أكتوبر 2024

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): بن حويط أيمن

2. الطالب (ة): مكاوي محمد شريف

تخصص: طاقات متجددة في الميكانيك

نمنح نحن الأستاذ (ة):

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الاصلية	الصفة	الامضاء
بن يلول كمال	Directeur de Recherche	مصصح (1)	
سبع حاج يحي	Maître de Conférences A	مصصح (2)	
بلغراس سيفية	Maître de Conférences A	مؤطر	 Dr. Siffia BELGHERRAS
بكوش سيدي محمد الأمين	Directeur de Recherche	المشرف المشارك	
بن حليلة وسام	Maître de Conférences B	رئيس اللجنة	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Orientation et inclinaison judicieuse d'un capteur thermique, Application à un chauffe-eau solaire

إمضاء رئيس القسم

مساعد رئيس قسم الآلة والكهروميكانيك
مكلف بما بعد الترخيب والبحث العلمي
حسن ناصر

