



Ecole Nationale
Polytechnique

Centre de Développement des
Energies Renouvelables



ECOLE DOCTORALE ENERGIES RENOUVELABLES

Mémoire de Magister

Option : Photothermique

Thème :

**INFLUENCE DE L'ANGLE D'INCIDENCE
MODIFIE SUR LES PERFORMANCES
D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN**

Présenté par Karim KACI

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Mr : Salah LARBI	Professeur, ENP	Président
Mme : Nachida MERZOUK-KASBADJI	Directrice de Recherche, CDER	Rapporteur
Mr : Maiouf BELHAMEL	Directeur de Recherche, CDER	Examineur
Mr : Hocine BENMOUSSA	Professeur, Univ. BATNA	Examineur
Mr : Larbi LOUKARFI	Professeur, Univ. CHLEF	Examineur
Mr : Mustapha MERZOUK	Maître de conférences, Univ. BLIDA	Invité

Année universitaire : 2009 - 2010

ملخص: قد أنشئت دراسة نظرية وتجريبية لتحديد تأثير زاوية السقوط على مردود لاقط شمسي مسطح في وسط صحراوي

للتعليمات الأوروبية « EN 12975-2 » و ذلك للحصول على الخصوصيات التالية : الثابت الزمني، المردود اللحظي و زاوية وقوع الأشعة .

النتائج التطبيقية سمحت ب انجاز رسم منحني المردود اللحظي للاقط واستنتاج المردود البصري و معامل الضياع الكلي

منحني اللاقط $K_{(\tau\alpha)}$ بدلالة تغيير زاوية الإسقاط بواسطة تغير مستوى

منحني اللاقط

تم بيان تأثير هذا المعامل على مردود اللاقط لعدة زوايا سقوط الأشعة خلال النهار بيانيا و تم ت مناقشة النتائج .

كلمات مفتاحية : لاقط شمسي، للتعليمات الأوروبية، مردود لحظي، الثابت الزمني، عامل زاوية وقوع الأشعة.

Résumé : Une étude théorique et expérimentale a été établie pour déterminer l'influence de l'angle d'incidence sur les performances d'un capteur solaire plan installé sur le site saharien de Ghardaïa.

Pour cela, un banc d'essai en boucle fermée a été monté conformément à la norme EN 12975-2. Les tests expérimentaux effectués, portent sur la constante de temps, le rendement instantané et l'angle d'incidence modifié.

Les résultats ont permis le tracé de la courbe de rendement du capteur et la détermination du rendement optique et des pertes thermiques globales vers l'extérieur.

La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux trouvés dans la littérature a montré une faible valeur du rendement optique dû à la détérioration du couvert du capteur.

Les tests relatifs à la détermination du facteur d'incidence modifié ont été effectués moyennant la variation de l'angle d'inclinaison du capteur. Ceci a permis la représentation du facteur $K_{(\tau\alpha)}$ en fonction de l'angle d'incidence θ .

L'effet de ce facteur sur le rendement à différents angles d'incidence durant la journée a été montré et les résultats ont été discutés.

Mot clés : Capteur solaire, normes d'expérimentations, rendement instantané, constante de temps et facteur d'angle d'incidence modifié.

Abstract: The main objective of this study is to determine the effect of the incidence angle on the thermal solar flat plate collector performances. Thus, for this aim, a theoretical and experimental study has been established. The experimental study has been performed by using a closed loop test bench realized and installed at the site of Ghardaïa (considered as hot and arid climate) according to the European standard EN 12975-2. The experimental tests are related to the time constant, the instantaneous efficiency and of modified incidence angle. As result, the experimental flat plate efficiency curve is drawn and from where are determined the optical efficiency and overall heat losses corresponding to the Mega sun solar collector.

Furthermore, the obtained results are compared with those proposed in the literature. A lower value of the optical efficiency is observed in this work which is due to the deterioration of the glass cover.

Otherwise, the determination of modified incidence angle coefficient is made through the flat plat solar collector slope variation. This allowed to get the curve representing the $K_{(\tau\alpha)}$ factor versus incidence angle θ . The effect of this factor at different angles on the collector efficiency is shown and the results are discussed.

Keys words: Solar collector, experiments standards, instantaneous efficiency, time constant and modified incident angle.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers
parents et à toute ma famille et
particulièrement à la mémoire de ma tante
et ma grande mère qui nous ont quitté à
jamais.*

REMERCIEMENTS

Je commence d'abord par remercier Dieu le tout puissant.

Je tiens à remercier vivement Madame N. KASBADJI-MERZOUK Directrice de recherche au Centre du Développement des Energies Renouvelables (CDER) d'avoir accepté d'être ma Directrice de mémoire et aussi pour sa patience, ces remarques et son suivi régulier.

Je tiens également à remercier Monsieur M. MERZOUK Maître de conférences à l'Université de Blida pour son assistance tout au long de cette étude, son expérience et ses conseils judicieux qui m'ont été d'une grande utilité.

Je remercie vivement Monsieur S. LARBI Maître de conférences à l'école national polytechnique qui m'a fait le privilège de présider le jury.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur M. BELHAMEL, Directeur de recherche, Directeur du CDER, pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury d'examination.

J'exprime aussi ma vive connaissance à Monsieur H. BENMOUSSA, Professeur et Directeur à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, pour l'honneur qu'il me fait d'examiner ces travaux.

Mes meilleurs remerciements vont aussi à Monsieur L. LOUKARFI Professeur à l'université de CHLEF pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury d'examination.

Que Monsieur MEDKOUR. RABAH trouve ici toute ma gratitude pour m'avoir aidé à réaliser le banc d'essai.

Pour leur soutien matériel ou moral, je voudrais également remercier L. SERIR et mes collègues de l'URAER, en particulier :, S. BENKACIALI, K. CHERIER, M. HAMDANI, S. KHEROUR, K. TOUAFEK , BATOUN. B ABDELKRIM. T et BENSLIMANE. T ainsi que M. GHRICI, S. LAIOURETE, F. HAMLII, M. BENGHANIA, Mourad. KACI, S. HAKEM M. KOUSSA et R. YAICHE et tous ceux qui m'ont soutenu jusqu'à l'aboutissement de ce modeste travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : ETAT D'ART ET PROBLEMATIQUE

1.1. Introduction.....	1
1.2. Capteurs solaires plans	1
1.3. Normes internationales mise en place.....	3
1.4. Test des capteurs solaires plans.....	6
1.5. Problématique.....	9
1.6. Conclusion.....	10

CHAPITRE 2 : MODELISATION DU CAPTEUR SOLAIRE

2.1. Introduction	11
2.2. Description des capteurs solaires plans.....	11
2.2.1. <i>Couverture transparente</i>	13
2.2.2. <i>Absorbeur</i>	15
2.2.3. <i>Isolation thermique</i>	17
2.2.4. <i>Mode de fonctionnement d'un capteur plan</i>	18
2.3. Modélisation du capteur solaire plan	18
2.3.1. <i>Puissance utile du capteur solaire plan</i>	18
2.3.2. <i>Détermination des pertes thermiques globales</i>	25
2.3.3. <i>Rendement instantané du capteur</i>	28
2.4. Conclusion	29

CHAPITRE 3 : MODELISATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

3.1. Introduction	30
3.2. Modélisation de l'angle d'incidence modifié.....	30

3.2.1. Eclairage solaire global reçu sur le capteur	30
3.2.2. Détermination du coefficient de transmission –absorption effectif	31
en fonction de l'angle d'incidence θ	
3.2.3. Angle d'incidence en fonction de l'inclinaison du capteur	37
3.3. Conclusion.....	44

CHAPITRE : 4 NORMES ET EXPERIEMNTATION

4.1. Introduction.....	45
4.2. Normes existantes.....	46
4.3. Expérimentation.....	47
4.3.1. Présentation du banc d'essai selon différentes normes	47
4.3.2. Instruments de mesures	50
4.3.3. Déroulement des tests	51
4.4. Réalisation du dispositif expérimental.....	58
4.4.1. Présentation du banc d'essai	58
4.4.2. Instrumentation de Mesure	62
4.4.3. Montage du cadre	64
4.5. Déroulement des tests expérimentaux	64
4.5.1. Détermination expérimentale de la superficie du capteur	64
4.5.2. Détermination expérimentale de la contenance en fluide	65
4.5.3. Régulation expérimentale du débit massique	65
4.5.4. Régulation de la température d'entrée du fluide	66
4.5.5. Mesure de l'angle d'incidence solaire	66
4.5.6. Conditionnement préalable aux essais	66
4.5.7. Etalonnage expérimental du banc d'essai	66
4.5.8. Test expérimentaux pour le calcul de la constante de temps	68
4.5.9. Test expérimentaux du rendement instantané.. ..	68
4.5.10. Test expérimentaux de l'angle d'incidence modifié.....	69
4.6. Conclusion	71

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Introduction	72
5.2. Résultats expérimentaux	72
5.2.1. Etalonnage du banc d'essai	72
5.2.2. Constante de temps.....	73
5.2.3. Rendement instantané	75
5.2.4. Angle d'incidence modifié	76
5.3. Discussion	79
5.3.1. Constante de temps	79
5.3.2. Rendement instantané	80
5.3.3. Angle d'incidence modifié	81
5.3.4. Effet des normes sur le rendement instantané	81
5.3.5. Effet de la surface du capteur sur le rendement instantané.....	84
5.3.6. Variation du rendement en fonction de l'incidence du rayonnement	86
5.3.7. Comparaison des capteurs solaires plans.....	87
5.3.8. Calcul d'incertitude	89
5.4. Conclusion	91

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE 2 : MODELISATION DU CAPTEUR SOLAIRE

Figure 2.1 : Schéma d'un capteur solaire plan avec vitrage.....	12
Figure 2.2 : Différents éléments d'un capteur solaire plan	13
Figure 2.3 : Absorbeur à ailettes.....	16
Figure 2.4 : Absorbeur à coussin.....	16
Figure 2.5 : Absorbeur Roll Bond.....	17
Figure 2.6 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan	19
Figure 2.7 : Représentation de la coupe de l'absorbeur	21

CHAPITRE 3 : MODELISATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

Figure 3.1 : Réflexion et réfraction du rayonnement incident.....	32
Figure 3.2 : Réflexion et réfraction multiples dans la vitre.....	33
Figure 3.3 : Absorption du rayonnement solaire par l'absorbeur.....	35
Figure 3.4 : Définition des angles caractérisant la position du soleil.....	37
Figure 3.5 : L'évolution de la déclinaison en fonction du numéro du jour.....	40
Figure 3.6 : L'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de la déclinaison.....	41
Figure 3.7 : L'évolution de $\cos(\omega)$ en fonction de l'angle horaire (ω).....	41
Figure 3.8 : L'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de $\cos(\omega)$	42
Figure 3.9 : L'évolution l'angle d'incidence en fonction de l'inclinaison.....	43

CHAPITRE : 4 NORMES ET EXPERIEMNTATION

Figure 4.1 : Présentation d'un banc d'essai en boucle fermée	47
Figure 4.2 : Présentation d'un banc d'essai en boucle ouverte.....	49
Figure 4.3 : Représentation du capteur solaire plan	59
Figure 4.4 : Le circulateur.....	59
Figure 4.5 : Le débit mètre.....	60

Figure 4.6 : Le vase d'expansion.....	60
Figure 4.7 : Le purgeur.....	61
Figure 4.8 : Le filtre a eau.....	61
Figure 4.9 : Le circuit secondaire.....	62
Figure 4.10 : Le thermocouple.....	62
Figure 4.11 : La thermopile.....	63
Figure 4.12 : Le pyranomètre.....	63
Figure 4.13 : L'acquisition de mesures.....	64
Figure 4.14 : Le dispositif d'étalonnage du capteur	67

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSION

Figure 5.1 : Ajustement des points de mesure de la constante de temps.....	74
Figure 5.2 : Représentation du rendement instantané du capteur	76
Figure 5.3 : Angle d'incidence modifié en fonction de l'angle d'incidence θ	78
Figure 5.4 : Angle d'incidence modifié en fonction de $[(1/\cos\theta)-1]$	78
Figure 5.5 : Rendement instantané du capteur selon le standard ASHRAE.....	83
Figure 5.6 : Rendement instantané du capteur selon le standard EN 12975-2.....	83
Figure 5.7 : Rendement instantané rapporté aux différentes surfaces du capteur.....	85
Figure 5.8 : Evolution du rendement instantané pendant la journée.....	87
Figure 5.9 : Comparaison des trois types de capteurs solaires.....	88

LISTES DES TABLEAUX

CHAPITRE 2 : MODELISATION DU CAPTEUR SOLAIRE

Tableau 2.1 : Quelques caractéristiques optiques des verres	14
Tableau 2.2 : Caractéristiques optiques des matériaux.....	14
Tableau 2.3 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur	15
Tableau 2.4 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.....	16
Tableau 2.5 : Quelques propriétés des isolants	18

CHAPITRE 3 : MODELISATION DE L ANGLE D INCIDENCE MODIFIE

Tableau 3.1 : Récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur l'angle d'incidence	43
---	----

CHAPITRE : 4 NORMES ET EXPERIEMNTATION

Tableau 4.1 : Comparaison entre les incertitudes du pyranomètre.....	50
Tableau 4.2 : Caractéristique des instruments de mesure recommandés par les standards	51
Tableau 4.3 : Condition des paramètres pendant les tests	52
Tableau 4.4 : Condition définissant le régime permanent ou quasi permanent.....	52
Tableau 4.5 : Comparaison entre les différents standards.....	57
Tableau 4.6 : Caractéristiques du capteur.....	59
Tableau 4.7 : Quelques caractéristiques de la pompe.....	60
Tableau 4.8 : Différents caractéristiques du vase d'expansion.....	61

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau 5.1 : Relevés des données expérimentaux pour l'évaluation de la74 constante de temps
Tableau 5.2 : Tests effectués pour le calcul du rendement instantané selon.....75 la norme EN 12975-2
Tableau 5.3 : Valeurs expérimentales relevées pour le calcul de $K_{\tau\alpha}$77
Tableau 5.4 : Résultats présentés selon la norme ASHRAE.....82

NOMENCLATURE

A_c	Surface	m^2
C_p	Chaleur massique	$KJ/kg^\circ C$
D	Diamètre	m
F	Efficacité de l'ailette	
F'	Efficacité de l'absorbeur	
F_1	Facteur de forme entre le capteur et le sol	
F_2	Facteur de forme entre le capteur et le ciel	
F_R	Facteur de conductance de l'absorbeur	
I_b	Composante directe de l'éclairement solaire	W/m^2
I_d	Composante diffuse de l'éclairement solaire	W/m^2
I_g	Eclairement solaire global incident	W/m^2
L	Longueur	m
l	Largeur	m
M	Masse d'eau dans le capteur	Kg
N_t	Nombre de tubes de l'échelle tubulaire	
P	Périmètre	m
Q	Flux de chaleur	W
Q_p	Puissance thermique perdue vers l'extérieur	W
Q_u	Puissance thermique utile récupérée par le fluide	W
R	Résistance thermique	$W/m^2^\circ C$
S	Surface du capteur	(m^2)
T_a	Température ambiante	$^\circ C$
T_c	Température du ciel	$^\circ C$
T_e	Température de la paroi externe du tube	$^\circ C$
T_e, T_s	Températures entrée et sortie du capteur	$^\circ C$
T_p, T_v, T_{mf}	Températures plaque, vitrage et moyenne du fluide	$^\circ C$
TSV	Temps solaire vrai	<i>heure</i>

U_c	Coefficient de pertes thermiques	W/m^2K
V	Vitesse du vent	m/s
W	Distance entre deux tubes	m
D	Diamètre	m
e	Epaisseur	m
h	Coefficient de transfert	W/m^2K
h_w	Coefficient de transfert par convection dû au vent	W/m^2K
k	Conductivité thermique.	$W/m^{\circ}C$
\dot{m}	Débit massique	Kg/s

Lettres grecques

α_p	Absorptivité de la plaque absorbante	
β	Angle d'inclinaison du capteur	<i>deg</i>
γ	Azimut du soleil	<i>deg</i>
γ_s	Déviation azimutale	<i>deg</i>
Φ	Latitude du lieu	<i>deg</i>
δ	Déclinaison du soleil	<i>deg</i>
$\varepsilon_v, \varepsilon_p$	Emissivité du couvert vitré et de la plaque absorbante..	
η	Rendements théorique du capteur et Rendement journalier	
θ	Angle d'incidence	<i>deg</i>
ρ	Réflectivité du sol (Albédo)	
ρ_d	Réflectivité du vitrage pour l'éclairement diffus	
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$W.m^{-2} K^{-4}$
$(\tau_v \alpha_p)_e$	Coefficient de transmission- absorption effectif du capteur	
τ_v	Transmittivité du vitrage	
φ	Latitude du lieu.	<i>deg</i>
ρ_d	Réflectivité du vitrage pour l'éclairement diffus	

Indices

<i>a</i>	Ambiance	
<i>av , ar</i>	Avant et arrière	
<i>c</i>	Capteur	
<i>cd, cv, ra</i>	Conduction, convection et rayonnement	
<i>g, b et d</i>	Globale, direct et diffus	
<i>f</i>	Fluide	
<i>i, e</i>	Interne et externe	
<i>is</i>	Isolation.	
<i>m</i>	Moyen	
<i>lat</i>	Latérale	
<i>p</i>	plaque	
<i>t</i>	Tube	

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie des capteurs solaires joue un rôle très important dans l'évolution de l'énergie et en particulier dans l'amélioration du profil de la demande électrique d'un pays.

Cependant, il y a différentes problématiques, qui doivent être lésées afin d'inscrire l'industrie des capteurs solaires vers une meilleure dynamique acceptée par le consommateur.

L'un des principaux obstacles est l'absence de procédure établie pour des essais et l'évaluation des systèmes et leurs composants et l'exigence obligatoire de normes locales et internationales de test des installations.

Le respect des normes par la certification des essais est l'une des principales conditions pour le succès de la mise en œuvre des capteurs solaires comme une option d'économie d'énergie.

Le développement et l'adoption des normes pour les capteurs solaires plans contribuent à améliorer les performances et la qualité des systèmes solaires et permettra le développement et la complétive du marché solaire.

Les capteurs solaires plans sont généralement installés sur des toitures existantes ou sur des structures fixes et ne sont pas munis de système de poursuite qui permettrait aux rayons de frapper la surface des capteurs à angle droit. En effet, le flux augmente lorsqu'il tend à être normal à la paroi, et il diminue lorsqu'il est rasant au capteur, ceci explique l'influence de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur l'énergie solaire captée par une surface donnée.

Les tests expérimentaux fournissent les bases permettant de déterminer les performances d'un capteur solaire plan à travers la production de sa courbe caractéristique du rendement instantané. Celle-ci indique la quantité d'énergie qui peut être récoltée pour un rayonnement solaire et une température d'exploitation définie.

D'autre part la détermination du rendement le long d'une journée passe par un facteur appelé angle d'incidence modifié du rayonnement solaire qui permet la correction à un instant donné les performances du capteur solaire plan.

L'angle d'incidence et la courbe caractéristique de rendement permettent d'établir précisément les performances journalières d'un capteur. Sur la base des résultats des tests de performance, on peut ensuite estimer le rendement journalier d'une installation.

Par ailleurs, la caractérisation des capteurs solaires plans et des systèmes solaires doit être réalisée selon des normes bien définies, ceci a amené les organisations nationales et internationales à unifier les méthodes de tests des dispositifs solaires et ceci afin de fournir des performances normalisées et comparables.

Le but du présent travail est la détermination de l'influence de l'angle d'incidence modifié sur le rendement du capteur. Pour cela, un modèle sur le capteur solaire plan vitré a été développé pour exprimer le rendement instantané rapporté à la température moyenne du fluide. Pour cela la dépendance du facteur $K_{\tau\alpha}$ sur l'angle d'inclinaison du capteur a été développée, afin de modéliser l'influence de l'angle d'incidence sur les performances journalières du capteur solaire plan. Une étude expérimentale a été menée.

Une première partie consiste à établir le rendement instantané d'un capteur solaire plan. Ce capteur possède un absorbeur sélective du type tube et ailette. Il est muni d'une seule vitre et isolé par l'arrière. La seconde partie consiste à modéliser le facteur

d'angle d'incidence en fonction de l'angle d'incidence θ afin de produire les performances journalières du capteur. Pour cela, une partie expérimentale a été suivit pour déterminer l'influence de l'angle d'incidence modifié sur le rendement instantané et journalier du capteur.

Un banc d'essai en boucle fermée a été mis en place à l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de Ghardaïa et ce conformément à la norme internationale EN 12975-2-2006.

Les résultats obtenus montrent la variation du rendement instantané en fonction de la température réduite, ainsi que l'influence de l'angle d'incidence modifié en fonction de l'angle d'incidence.

En variant l'angle d'inclinaison du capteur, l'effet de l'angle d'incidence sur les performances du capteur à différent incident du rayon de soleil pendant la journée ont été déterminés.

CHAPITRE : 1

ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

1.1. INTRODUCTION.....	1
1.2. CAPTEURS SOLAIRES PLANS	1
1.3. NORMES INTERNATIONALES MISE EN PLACE.....	3
1.4. TEST DES CAPTEURS SOLAIRES PLANS.....	6
1.5. PROBLEMATIQUE.....	9
1.6. CONCLUSION.....	10

1.1. INTRODUCTION

Les capteurs solaires plans sont les systèmes les plus simples de conversion d'énergie solaire en énergie calorifique.

Nous allons citer dans le présent chapitre les principaux travaux effectués de part le monde et en Algérie sur leurs modélisations théorique et expérimentale.

L'état de l'art des travaux de recherche effectués dans le domaine des capteurs solaires plans, des normes d'expérimentation est passé en revue. Ceci afin de cerner la problématique dégagée pour le présent travail.

Enfin la problématique de la présente étude est présentée.

1.2. CAPTEURS SOLAIRES PLANS

Parmi les travaux scientifiques portant sur la caractérisation et l'étude des performances des capteurs solaires plans, nous pouvons citer en ordre chronologique les travaux portant sur la théorie du capteur, établis par Hottel et Woertz en 1942 [1].

Depuis, d'autres études ont été faites notamment celle portant sur la modélisation relative à différentes configurations de capteurs plans, et celle R.W. Bliss en 1959 [2] portant sur de nouvelles méthodes de calcul du facteur d'efficacité appliquées pour plusieurs modèles de capteurs solaires plans.

En 1974 S. A.Klein, J. A. Duffie et W. A. Beckman [3] ont publié une étude sur l'effet de la capacité thermique sur la modélisation des performances d'un capteur solaire souvent négligé afin de simplifier les calculs.

S. I. Abdel-khallik [4] a établi une modélisation d'un capteur plan dont la configuration de l'absorbeur distingué par un tube collecteur en forme de serpent, soudé au dessus de la plaque.

C. Smith [5] ont présenté en 1977 une nouvelle méthode de calcul du rendement de Hottel, Whillier et Bliss. La méthode permet le calcul du facteur de conductance Fr à

partir des essais effectués pour un coefficient des pertes thermiques globales proche de zéro.

Warren. F. [6] en 1979 a présenté une méthode qui prédit les performances d'un capteur solaire en incluant les effets de la conduction axiale dans l'absorbeur.

P. J. Lunde [7] en 1981, contribue à la détermination de l'expression du coefficient de transfert de chaleur pour différentes températures du capteur solaire plan.

M. R. Zugari et J. J. Villierme [8] en 1993, ont amélioré les performances thermiques d'un capteur solaire par l'intégration d'une structure à lamelles sur l'absorbeur.

R. Avezov, N. A. Kakharov et K.B.Khoddzhiev [9] en 1994, ont amélioré les performances thermiques d'un capteur solaire par diminution de la température de l'absorbeur en utilisant un dispositif démontable plaque-tube.

En parallèle, de nouveaux types de capteurs solaires sont réalisés en Tunisie. On peut citer les travaux de N. Abid et A. Tayeb [10] en 2008 qui ont développé un nouveau type de capteur solaire de type autotoqueur cylindro-parabolique (CPC).

Il faut noter qu'en Algérie, il n'existe pas beaucoup de travaux portant sur l'étude des performances et la caractérisation des capteurs solaire plans. On peut citer les travaux suivants :

En 1989, M. Hellel [11] au CDER a étudié les performances thermiques de capteurs solaires plans sans vitrage.

En 1990, N. Rahni [12], a réalisé au CDER une étude sur l'estimation des performances mensuelles moyennes d'un chauffe-eau solaire à long terme à thermosiphon par la méthode F-Chart.

La même année, A. Hamid [13] du CDER a réalisé et expérimenté des capteurs solaires plans dans le but d'optimiser la surface de captation d'une installation de chauffage d'eau solaire collectif.

D. Semmar [14] a contribué à l'étude et la conception d'un capteur solaire à air pour la production d'air chaud au sein du CDER. Il définit un certain nombre de règles et de critères pour les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur.

H. Abdi en 1999 [15] de l'université de Blida a établi une étude portant sur un nouveau prototype de capteurs solaire plans à contact direct eau-plaque absorbante. L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'effet de la forme de la plaque absorbante (convexe et concave) sur le rendement du capteur.

En 2001 D. Lafri [16] a étudié dans le cadre d'un mémoire de magister, les performances d'un chauffe-eau solaire pour prévoir le comportement thermique de l'eau dans la cuve de stockage. Il conclue qu'avec une capacité de stockage élevée, le rendement des systèmes solaires croit.

F. Bouhired [17] a réalisé au sein du CDER une étude sur l'amélioration du rendement d'une installation solaire en utilisant la télésurveillance dans le but de faciliter éventuellement la détection et le diagnostic d'un dysfonctionnement au niveau de l'installation.

S. Hakem [18] en 2010, a réalisé un travail théorique et expérimentale sur les performances journalières d'un chauffe eau solaire avec une approche stochastique des paramètres météorologiques afin d'estimer la température de stockage.

1.3. NORMES INTERNATIONALES MISE EN PLACE

La normalisation des tests des capteurs plans solaires a commencé dans les débuts des années 1970 par la publication du bureau national de standardisation (NBS) sous le

numéro 74-635: « Development of proposed standard for testing solar collectors and thermal storage » [19].

En février 1977 les standards Américains ASHRAE 93-77 [20] (American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers,INC) ont été mis en place sous le titre : « Methods of testing to determine the thermal performance solar collectors ». Il en résulte en 1989 les normes ASHRAE 96-1989 développés pour les tests des capteurs plans et sous vide à fluide caloporteur liquide. En 2003, les normes ASHRAE (ASHRAE 93-2003) ont été modifiées avec leurs généralisations à tous type de capteurs solaires plans. Enfin les normes les plus récentes proviennent d'un laboratoire de Floride. C'est des nouvelles méthodes de tests et de certification des capteurs solaires plans appelé SRCC-document OG-100 2005 issues d'une synthèse entre les normes ISO 9806- et les normes ASHRAE [21].

En juin 1980, l'université de Cardiff en grande Bretagne a publié de nouvelles recommandations propres au continent Européen intitulé « Recommendations for European solar collector test methods liquid heating collectors ». Ces dernières ont été actualisées en mars 2006 EN 12975-2 -2006 [22] remplaçant les EN 12975-2 -2001 sous le nom de «Installations solaires thermiques et leurs composants, capteurs solaires, partie 2 : Méthode d'essai dans les différents régimes».

En 1982, les australiens ont développé leurs propres standards 2535-198 [23] sous le nom « Solar collectors with liquid as the heat-transfert fluid-method for testing thermal performance ».

Plus tard en 1994 de nouvelles normes internationales ISO 9806-1 ont été mises en place [24]. Elles portent sur trois parties d'essai des capteurs solaires :

- Partie 1 ISO 9806-1 traite « les performances thermiques des capteurs vitrés à liquide avec chute de pression incluse » ;
- Partie 2 produite en 1995 appelé ISO 9806-2 qui a pour objectif les essais de

fiabilité ;

- Partie 3 développée en 1996, nommé ISO 9806-3 et qui concerne les capteurs sous vides.

En 2005 un laboratoire du Canada a établi des normes de certification des capteurs plans solaires propre à leur pays sous le nom CSA-F378-87 [25].

Hayward en 1979 [26] a mis en place les premières méthodes de tests des capteurs solaires aux États-Unis d'Amérique. Il a été suivi plus tard en 1981 de G. Beghi [27] qui met en évidence son expérience dans le domaine des tests expérimentaux et introduit des recommandations sur le déroulement des tests de performance des capteurs plans à liquides.

D. Proctor [28] en 1984 a apporté un plus puisqu'il a contribué à la généralisation des méthodes de tests pour tout type de capteurs plans. En effet, il propose un nouveau modèle de linéarisation de l'équation caractéristique de la courbe du rendement instantané.

En 1991, B. Bouges et al [29] sont les premiers à pousser l'étude par l'introduction de modèle d'analyse statistique portant sur la précision des mesures et l'estimation des erreurs dans les tests journaliers mis en place dans les normes Européennes. Ils ont présenté aussi des résultats sur la prédiction à long terme des performances d'un capteur solaire plan.

L. Gahal Morrison [30], de l'université de Sydney en Australie expose en 1995 un travail au congrès mondial du solaire à Harare sur l'évaluation et la comparaison de cinq des normes type ISO 9459 pour les performances des chauffe-eau solaires appliqués à des dispositifs peu complexes.

1.4. TEST DES CAPTEURS SOLAIRES PLANS

En 1996 N. D. Kaushika [31], a présenté un rapport à l'institut technologique de New Delhi sur une méthode de détermination du produit transmission-absorption du rayonnement solaire. La méthode a été testée sur trois configurations différentes de nid d'abeille, où il confirme l'importance d'utilisation des nids d'abeille ainsi que leurs formes dans les performances optiques d'un capteur solaire plans.

De même, à l'institut technologique de Bombay, E. H. Amer, [32] a établi une étude comparative des méthodes de tests selon un régime dynamique en utilisant les normes ASHRAE 93-86. S'inspirant de cette étude, il propose une nouvelle méthode de test en réduisant la période de test à une courte durée.

En Italie, V. Sabatelli [33] du laboratoire d'énergie solaire de Rontondella ont mis en place en 2001, une méthode d'analyse d'incertitude et de sensibilité de mesures pour les tests selon les normes ISO 9806-1.

Afin d'intégrer les normes internationales en matière de test du chauffe-eau solaire, O. Dintchev et al [34] de l'université de Tshane en Afrique du sud ont lancé en 2003 un projet de mise en conformité des normes sud africaine sous le nom de SANS 211-2-2003.

La même année, Y. M. Li [35] du mechanical d'engineering à l'université de Taiwan a publié un travail sur l'évaluation d'incertitude de mesure pour les tests de performances de capteurs solaire selon les normes ISO 9806-1 permettant l'estimation des erreurs lors du tracé de courbe du rendement instantané d'un capteur solaire plan selon deux méthodes de probabilité différentes.

Les travaux de S. Fisher, H. M. Steinhagen [36], de l'université de Stuttgart en Allemagne ont présenté en 2004 une nouvelle norme applicable pour deux régimes différents selon les normes EN 12975, Ils ont proposé des paramètres additionnels pour l'extension de cette norme aux tests des capteurs CPC. Ils ont effectué une autre

étude sur le comportement de l'angle d'incidence modifié multiaxial sur deux sortes de capteurs à tubes évacuées. Ils ont conclu l'importance du calcul de l'angle d'incidence biaxial (transversal et longitudinal) sur le rendement pour ce type de capteur.

Par ailleurs, H. J. Hou [37] du centre d'ingénieur du solaire et du froid de Shanghai en Chine, a développé en 2004 une nouvelle méthode de calcul de la constante du temps du capteur solaire plan. Il a éliminé la condition du maintien de la température d'entrée du fluide à la température ambiante.

L'étude effectuée en 2002, par M. G. Kratzenberg, à l'institut de mécanique à l'université Santa Catarina au Brésil [38] a porté sur un projet de certification des capteurs solaires à travers la réalisation d'un banc d'essai conforme aux normes ISO 9806-1 et EN 12975-1. Ceci afin de produire des résultats de tests normalisés et adaptés aux conditions climatiques propres au Brésil.

En 2006, J. Facao [39], de la faculté d'ingénierie de Porto en Portugal a présenté une procédure d'estimation des incertitudes de mesures des paramètres de calcul de la courbe caractéristique du rendement instantané du premier ordre pour de faible valeur de la température réduite.

G. Boudihardjo, L. Morison [40] de l'université de Sydney en Australie ont effectué une étude comparative des performances de deux types de capteurs solaire, l'un plan et l'autre sous vide. Ils ont déduit que le stockage dans le capteur sous vide est moins sensible à la variation de température que pour le capteur solaire plan.

D. Rojas et A. Klein [41] du laboratoire d'énergie solaire de l'université de Wisconsin aux Etats Unis d'Amérique ont comparé les normes ASHRAE 93-2003 aux normes EN 12975-2 en testant un capteur plan à un seul vitrage. Ils ont conclu que les coefficients $F_R (\tau\alpha)_{\text{eff}}$ et $F_R U_L$ sont proches, par contre pour l'angle d'incidence modifié, il s'est avéré plus précis avec la norme ASHRAE.

Peu de travaux ont été réalisés dans le domaine de la normalisation au Maghreb. On peut citer l'étude réalisée en septembre 2001 au Maroc [42], travaux inspirés des normes internationales telles qu'ISO 9806, ISO 9060 et ISO 9846. De nouvelles méthodes d'essai (NM ISO 9488) permettant de valider les prescriptions de durabilité et de fiabilité pour les capteurs solaires plans ont été mises en place. Ces méthodes ne sont applicables que pour les chauffe-eau solaires avec stockage intégré.

A. Ghedira. [43] du laboratoire d'énergie solaire de la faculté des sciences de Rabat au Maroc a mis en place à l'école nationale de l'industrie minérale, un banc d'essai pour l'évaluation des performances thermiques des capteurs solaires plans. Il effectue des tests à l'extérieur, d'une série de capteurs commerciaux, d'importations et de conception locale.

C. Bouden et S. Boufares [44] du laboratoire d'énergie solaire de l'école nationale d'ingénieurs de Tunis, ont mis au point une procédure d'automatisation de mesure sur un banc d'essai de chauffe-eau solaire. Ils effectuent depuis quelques années des tests sur des capteurs solaires et leurs composants en utilisant la méthode DST. Actuellement ils travaillent pour mettre au point une procédure de tests pour l'ensemble des chauffe-eau solaires adapté au contexte tunisien.

On peut citer aussi l'étude effectuée en 1986 par N. Kasbadji [45] au CNR de Padoue en Italie, qui porte sur l'étude théorique et expérimentale de trois capteurs solaires plans en régime permanent. Les tests se sont déroulés à l'aide d'un banc d'essai en boucle fermée réalisée selon le standard ASHRAE. Une autre étude a été menée auprès du CNR de Padoue Italie est celle de M. Merzouk, dans le cadre d'un magister présenté au HCR [46]. Cette étude a porté sur une contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires sous vides en régime permanent.

En 1987, un capteur solaire plan à un seul vitrage produit par l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) a été testé au niveau du laboratoire

de thermique de CDER à l'extérieur en boucle ouverte selon la norme ASHRAE, Européenne et Australienne. En 1988, un second capteur solaire plan avec une couche sélective sur la plaque absorbante à base de nickel noir a été testé par la même équipe.

En 1989 une étude théorique et expérimentale du capteur solaire sans couvert avec absorbeur en TN40 a été réalisé au CDER [47].

En 1998, une étude similaire à la précédente a été réalisée à l'université de Batna par K. Boulghras [48], sur les performances d'un capteur solaire sous vide.

En 2008, F. Yettou [49], a réalisé un banc d'essai pour le test des chauffe-eau solaires à circulation forcée à l'université de Batna.

1.5. PROBLEMATIQUE

Les performances journalières d'un capteur solaire dépendent principalement des paramètres thermophysiques du fluide caloporteur, des constituants du système et des paramètres météorologiques.

Ces derniers sont variables au cours de la journée à cause de la position du soleil par rapport au capteur. Pour le calcul des performances du capteur à n'importe quelle incidence de la journée, un banc d'essai en boucle fermée selon les normes EN 12975, a été conçu au sein de L'unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables sise à Ghardaïa. Région caractérisée par un fort ensoleillement et un indice de clarté très important.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'étude des performances thermiques des capteurs solaires plans. Néanmoins, il y a peu de travaux sur l'effet de l'angle d'incidence modifié sur le rendement journalier du capteur.

En effet, le présent travail porte sur l'étude de l'influence de l'angle d'incidence sur les performances des capteurs solaires plans ainsi que sur leur fiabilité et leur durabilité.

1.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'essentiel des travaux ayant une relation directe avec le sujet étudié a été présenté. En effet les principaux travaux relatifs aux normes existantes, ainsi qu'au calcul des performances du capteur solaire plan que ça soit dans le monde, au Maghreb ont été cités.

On peut conclure qu'en Algérie la plupart des travaux présentés sur la modélisation de diverses configurations de capteurs solaires. Mais les études expérimentales restent peu nombreuses. Ceci par le fait d'absence d'une norme Algérienne qui s'adaptera aux climats locaux.

CHAPITRE : 2

MODELISATION DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN

2.1. INTRODUCTION	11
2.2. DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLANS.....	11
2.2.1. <i>Couverture transparente</i>	<i>13</i>
2.2.2. <i>Absorbeur</i>	<i>15</i>
2.2.3. <i>L'isolation thermique.....</i>	<i>17</i>
2.2.4. <i>Mode de fonctionnement d'un capteur plan</i>	<i>18</i>
2.3. MODELISATION DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN	18
2.3.1. <i>Puissance utile du capteur solaire plan</i>	<i>18</i>
2.3.2. <i>Détermination des pertes thermiques globales</i>	<i>25</i>
2.3.3. <i>Rendement instantané du capteur</i>	<i>28</i>
2.4. CONCLUSION	29

2. 1. INTRODUCTION

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) qui met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé [50]. Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eau solaires en Californie.

La conversion thermique du rayonnement solaire se fait entre autre par l'intermédiaire d'un dispositif appelé « capteur solaire plan ». Il transforme aussi efficacement que possible le rayonnement solaire en chaleur calorifique. Il constitue aussi le lien entre l'énergie solaire incidente et le consommateur.

Dans le présent chapitre on décrit les différents composants des capteurs solaires plans et leurs fonctionnements. Il s'agira de présenter le capteur solaire plan à un seul vitrage, objet de notre présent travail.

Par ailleurs, une modélisation détaillée des performances instantanées du capteur solaire plan est présentée.

2. 2. DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLANS

Il existe une grande gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre aux différents besoins de chauffage des liquides. Leur choix dépend de la température de besoin et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. Bien entendu, plus le niveau de température est élevé, plus les technologies mises en oeuvre ne sont évoluées et plus les coûts de production sont élevés.

Les technologies les plus courantes sont :

- Le capteur plan non vitré : Ce type de capteur est conseillé pour des basses températures de service ; moins de 40°C. Il est généralement utilisé pour le chauffage des piscines.
- Le capteur plan vitré : Il est recommandé pour les moyennes températures de Service ; entre 30° C à 80°C. Il est utilisé généralement pour le chauffage de l'eau sanitaire, la distillation, et le séchage solaire....

- Le capteur à tubes évacués : Ce capteur est conseillé pour des hautes températures de service ; plus de 70°C. Il est surtout appliqué pour le chauffage des locaux ou la production du froid solaire.

Il existe d'autres technologies, telles que les capteurs à double-vitrage, les capteurs à concentrateurs et les capteurs avec stockage intégré (autostockeur).

Les pays froids ont généralement besoin de dispositifs à rendement élevé, pour ce faire, on peut équiper un capteur :

- D'un double vitrage ;
- D'un couvert muni d'une couche anti-reflet ;
- D'un revêtement sélectif sur l'absorbeur qui ne réémet qu'une faible portion de l'énergie absorbée.

Le capteur solaire plan, représenté en figure 2.1 [51] est le modèle le plus courant.



Figure 2.1 : Schéma d'un capteur solaire plan avec vitrage.

Il convient particulièrement pour le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage des locaux. Il est souvent utilisé dans des climats tempérés. Ce capteur fonctionne toute l'année lorsque le fluide caloporteur est un mélange d'eau et d'antigel.

Le capteur solaire plan objet de la présente étude, est constitué d'un cadre fixe, sur lequel sont posé un simple vitrage à l'avant et un isolant à l'arrière. Une feuille métallique noire, sur laquelle est posé une échelle tubulaire joue le rôle de l'absorbeur qui, transmet les calories vers le fluide.

En figure 2.2 sont représentés les différents composants du capteur solaire plan étudié.

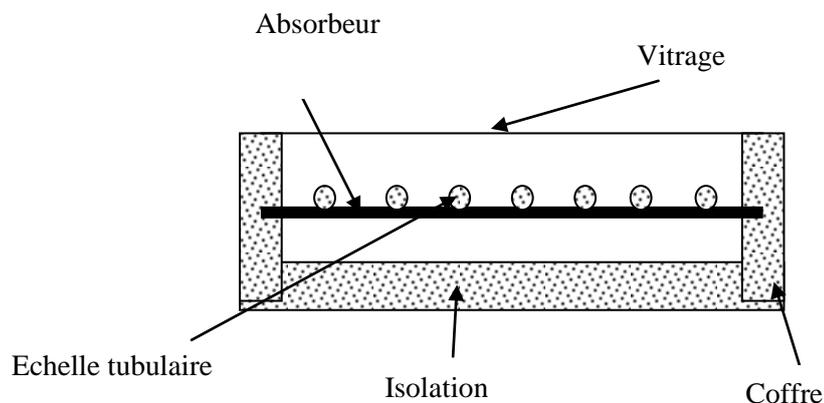


Figure 2.2 : Différents éléments d'un capteur solaire plan

2.2.1. COUVERTURE TRANSPARENTE

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage), le verre sécurisé est principalement utilisé comme couverture transparente. Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire.

Dans le cas de capteurs intégrés en toiture, des matières synthétiques sont parfois utilisées. Leur durée de vie est plus faible que celle du verre ordinaire, mais elles sont plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse ainsi la fraction réfléchie du rayonnement solaire incident, afin de diminuer un éventuel éblouissement.

Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont :

- Le coefficient de transmission (τ) ;
- Et l'émissivité (ε).

Le coefficient de transmission (τ) est essentiellement déterminé par la structure du vitrage (double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage).

Les propriétés de divers types de verre sont données au le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Quelques caractéristiques optiques des verres [51]

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre Clair	8%	9%	83%
Verre basse teneur en Fe_2O_3	8%	2%	90%

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur.

Au tableau 2.2 sont données les caractéristiques optiques des matériaux, utilisés comme couverture transparente.

Tableau 2.2 : Caractéristiques optiques des matériaux [52]

Matériaux	Indice réfraction	Epaisseur (mm)	Transmittivite
Verre	1.518	3-4	0.840
Lexan	1.586	3-4	0.840
Teflon	1.343	0.05	0.960
Tedlar	1.460	0.10	0.920
Mylar	1.640	0.10	0.870
Kynar	1.410	0.10	0.930
Marlex	1.50	0.10	0.920

Actuellement le verre le plus utilisé pour les capteurs solaire plan est le verre prismé. Sa particularité est de diminuer la partie du rayonnement réfléchi (1.5%). Contrairement au verre trompé classique. Lorsque l'angle d'incidence est faible. Ce verre peut atteindre jusqu'à 96% de transmission.

2.2.2. ABSORBEUR

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan. C'est généralement un corps noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il converti le rayonnement solaire capté en chaleur calorifique.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Un bon coefficient d'absorption ;
- Une bonne conductivité thermique ;
- Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur. Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs sont généralement en cuivre, en acier ou en aluminium.

Au tableau 2.3 sont données les caractéristiques de divers métaux pouvant être utilisés comme absorbeur.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme l'absorbeur [51]

Matière	Conductibilité (W/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2.38
cuivre	380	1.65
Zinc	112	2.9
Acier	52	1.15
Inox	52	1.15
Plastiques	0.2-0.4	7-20

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche sélective. Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de chrome.

Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Revêtements des surfaces d'absorbeur [51]

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0.92 à 0.97	0.95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0.95	0.14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0.91	0.07
Tinox (sélectif)	0.95	0.05

2.2.2.1. Absorbeur à ailettes

Il est constitué d'un tube, généralement en cuivre, sur lequel sont fixées des ailettes en cuivre, acier ou aluminium. Le liquide caloporteur circule dans les tubes (voir la figure 2.3) [52].

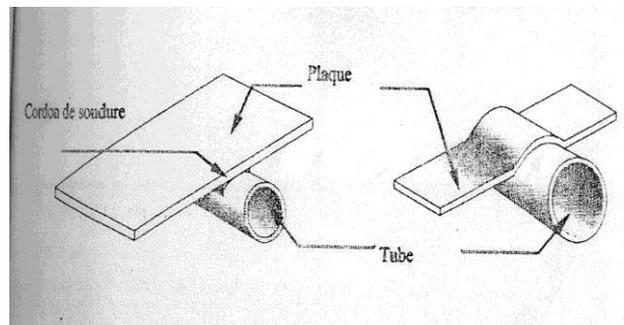


Figure 2.3 : Absorbeur à ailettes

2.2.2.2. Absorbeur à coussin

Il est constitué de deux tôles en acier ou en acier inoxydable, soudées l'une à l'autre suivant un dessin bien précis. Le liquide caloporteur circule dans l'espace aménagé entre les tôles espacées entre elles de 2 à 4 mm (figure 2.4) [52].

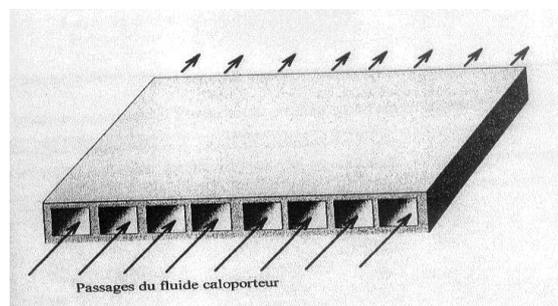


Figure 2.4 : Absorbeur à coussin

2.2.2.3. Absorbeur «Rollbond »

Il est constitué, tout comme l'absorbeur à coussin de deux tôles, en aluminium, assemblées selon le système «Rollbond». Dans ce cas, le liquide caloporteur circule dans les canaux aménagés entre les deux tôles assemblées comme le définit la figure 2.5. [52].

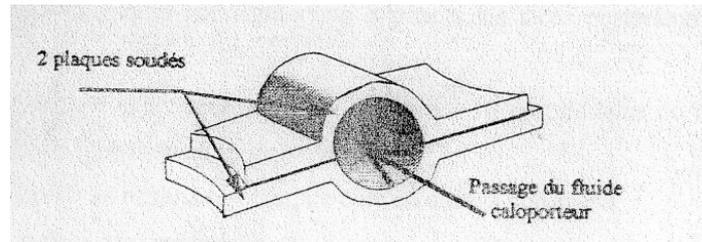


Figure 2.5 : Absorbeur Roll Bond

Ces canalisations peuvent avoir une section de géométrie quelconque (ovale, hexagonale, circulaire...etc.).

2.2.3. ISOLATION THERMIQUE

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ceux-ci doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan.

L'isolation doit généralement avoir une épaisseur de l'ordre de 5 à 10 cm. Les matières isolantes utilisées sont soit des laines minérales, soit des matières synthétiques (de laine de verre, mousse expansives de polyuréthane ou polystyrène).

Elle doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur.

Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- La masse volumique ;
- La température maximale d'utilisation en régime permanent ;
- La résistance au feu, aux rongeurs et à la putréfaction ;
- La sensibilité à l'humidité et son coût.

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Quelques propriétés des isolants [15]

Isolant	Conductivité thermique max à 500W/m °C max	Température max
Laine de verre	0.041	150
Laine de roche	0.05	150
Polyuréthane	0.027	110
Polystyrène	0.039	85
Liège expansé	0.042	110

2.2.4. MODE DE FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

Le capteur plan effectue la transformation de l'énergie solaire incidente arrivant sur celui-ci en énergie thermique à basse température. Cette transformation est assurée par un processus appelé l'effet de serre. Les rayons du soleil émis en majorité dans la gamme des longueurs d'onde visible ($\sim 0.5 \mu\text{m}$), traversent la couverture transparente du capteur et tombent sur l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. Du fait de sa température, il réémet vers l'avant dans la gamme infrarouge ($\sim 9\mu\text{m}$).

Le verre est parfaitement opaque à l'infrarouge et réfléchit à nouveau les rayons vers l'absorbeur. La chaleur reste donc prisonnière entre la couverture transparente et l'absorbeur. Cette énergie est transmise vers le liquide caloporteur qui circule dans l'échelle tubulaire du capteur qui conduit cette chaleur vers l'utilisation.

2.3. MODELISATION DU CAPTEUR PLAN SOLAIRE

2.3.1. PUISSANCE UTILE DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN

La modélisation d'un capteur plan solaire passe par l'établissement d'un bilan thermique, pour l'évaluation des gains et des pertes thermiques de la structure.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont posées :

- Le régime de l'écoulement est quasi stationnaire ;

- La température du ciel est uniforme ;
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour de grandes longueurs d'ondes ;
- Les caractéristiques des matériaux du capteur sont supposées constantes par rapport à la température ;
- La température du vitrage est uniforme ;
- La vitesse d'écoulement et la distribution de la température sont unidimensionnelles ;
- La construction du capteur est uniforme ;
- L'effet de la température suivant l'axe des z est négligeable car la plaque est supposé très mince ;
- Le régime est établi ;
- L'effet d'ombre est négligeable ;
- La couverture transparente est nette de toute poussière ou autre saleté ;
- La température de l'absorbeur est uniforme.

En figure 2.6 est représenté le bilan thermique effectué autour du capteur solaire thermique.

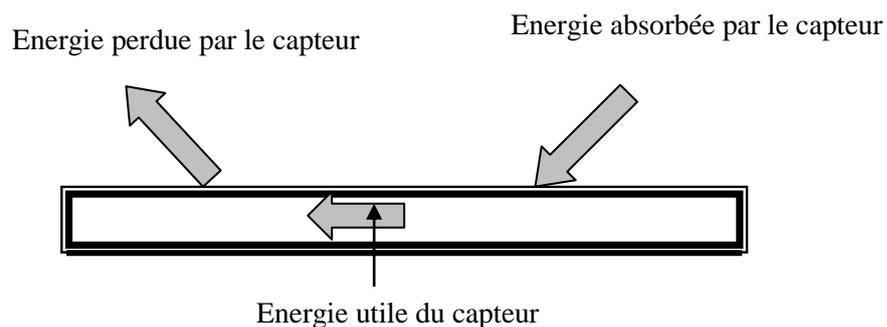


Figure 2.6 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan

Le bilan thermique d'un capteur plan s'obtient simplement en écrivant que l'énergie absorbée se répartie en:

$$q_a = q_u + q_p \quad (2.1)$$

q_a : Energie absorbé par l'absorbeur. (Joule)

q_u : Energie extraite du capteur par le fluide caloporteur. (Joule)

q_p : Energie perdue par le capteur dans l'environnement. (Joule)

En termes de puissance on aura :

$$Q_a = Q_u + Q_p \quad (2.2)$$

Q_a : La puissance solaire transmise et absorbée par l'absorbeur.

Elle est en fonction de l'angle d'incidence du soleil θ . tel que :

$$Q_a = S(\theta) A_c \quad (2.3)$$

La puissance thermique perdue vers l'extérieur s'écrit :

$$Q_p = U_c (T_p - T_a) A_c \quad (2.4)$$

Avec :

U_c : Coefficient de pertes thermiques globales vers l'extérieur ; (W/m^2K)

T_a : Température ambiante ; (K) ;

T_p : Température de la plaque absorbante ; (K)

A_c : Surface du capteur (m^2).

En remplaçant les puissances par leurs expressions respectives, la puissance thermique récupérée par le fluide caloporteur se met alors sous forme :

$$Q_u = Q_a - Q_p = A_c [S(\theta) - U_c (T_p - T_a)] \quad (2.5)$$

- *Puissance utile en fonction de la température moyenne du fluide :*

Pour dresser le bilan thermique détaillé du capteur solaire étudié, la configuration de l'absorbeur est schématisée en la figure 2.7.

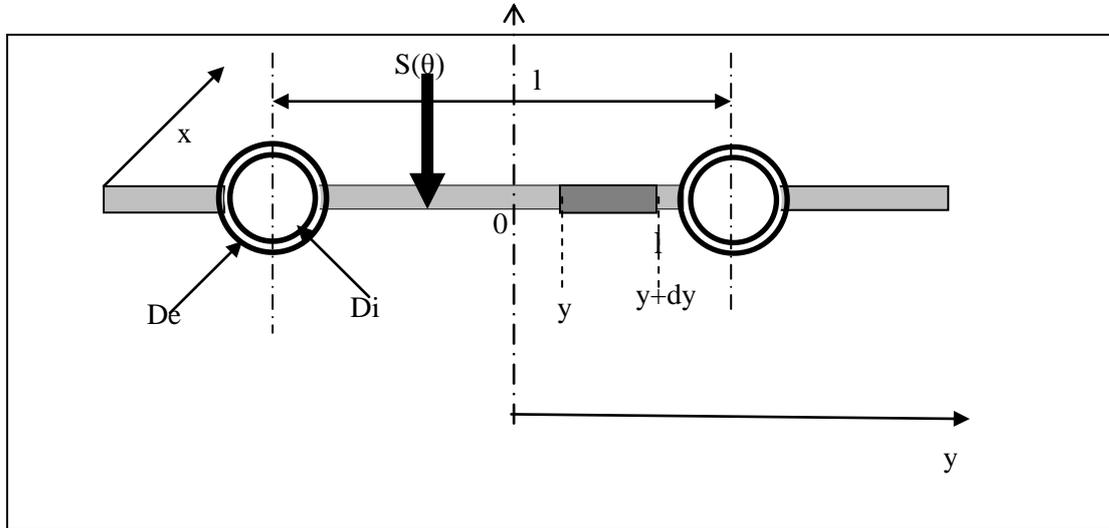


Figure 2.7 : Représentation de la coupe de l'absorbeur

Le bilan thermique sur un élément de la plaque de longueur unitaire compris entre y et $y+dy$ tel que représenté en figure 2.7 s'écrit [54]:

$$S(\theta) - k e_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_y + k e_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_{y+dy} - U_c (T_p - T_a) dy = 0 \quad (2.6)$$

e_p : Epaisseur de la plaque absorbante ; (m)

k : Conductivité thermique de la plaque absorbante ; (W/m °C).

Après simplification l'équation (2.6) s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} = \frac{U_c}{k e_p} \left(T_p - T_a - \frac{S(\theta)}{U_c} \right) \quad (2.7)$$

On pose $\bar{T}_p = T_p - T_a - \frac{S(\theta)}{U_c}$ et $\omega^2 = \frac{U_c}{k e_p}$

On obtient alors l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_p}{\partial y^2} - \omega^2 \bar{T}_p = 0 \quad (2.8)$$

La solution de cette équation s'écrit :

$$\bar{T}_p(y) = A \sinh(\omega y) + B \cosh(\omega y) \quad (2.9)$$

Dont les conditions aux limites sont :

$$y = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial \bar{T}_p}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial \bar{T}_p}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \text{ (Symétrie)} \quad (2.10)$$

$$\text{Et } y = \frac{\ell - D_e}{2} \rightarrow \bar{T}_p = T_t \quad (2.11)$$

Après l'application des conditions aux limites, on obtient :

$$\begin{cases} A = 0 \\ \text{Et } B = \frac{T_t - T_a - \frac{S(\theta)}{U_c}}{\cosh\left[\omega\left(\frac{1 - D_e}{2}\right)\right]} \end{cases} \quad (2.12)$$

En remplaçant A et B par leurs valeurs dans l'équation (2.9), on obtient :

$$\bar{T}_p = T_p(y) - T_a(y) - S(\theta) = \frac{T_t - T_a - \frac{S(\theta)}{U_c}}{\cosh\left[\omega\left(\frac{1 - D_e}{2}\right)\right]} \cosh(\omega y) \quad (2.13)$$

Par ailleurs, le flux transféré vers le tube s'écrit :

$$\begin{aligned}
d\phi_{p \rightarrow t} &= -k e_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_{\frac{\ell - D_e}{2}} = - \frac{T_t - T_a - \frac{S(\theta)}{U_c}}{\cosh \left[\omega \frac{(\ell - D_e)}{2} \right]} \omega k e_p \sinh \left[\omega \frac{\ell - D_e}{2} \right] \quad (2.14) \\
&= \frac{1}{\omega} [T_t - T_a - S(\theta)] \tanh \left[\omega \frac{(\ell - D_e)}{2} \right]
\end{aligned}$$

L'ailette étant supposée à une température uniforme T_t , le flux de chaleur transféré par cette ailette au tube sera [54] :

$$d\phi_{p \rightarrow t_{\max}} = F[S(\theta) - U_c(T_t - T_a)](1 - D_e) \quad (2.15)$$

$$F = \frac{\tanh \left[\omega \frac{(\ell - D_e)}{2} \right]}{\omega \left(\frac{(\ell - D_e)}{2} \right)} \quad (2.16)$$

Par ailleurs, le flux utile total arrivant sur la paroi externe du tube par unité de longueur selon la direction de l'écoulement du fluide s'écrit :

$$d\phi_{\rightarrow t} = [D_e + F(1 - D_e)][S(\theta) - U_c(T_{mt} - T_a)] \quad (2.17)$$

Ce flux utile est transmis au fluide par conduction à travers l'épaisseur e_t du tube, à travers la soudure et par convection entre la paroi interne du tube et le fluide.

On suppose que les soudures sont de bonne qualité, ce qui permet de les négliger par rapport au transfert par conduction [53].

D'où :

$$d\phi_u = \left(\frac{e_t}{k \pi D_i} + \frac{1}{h_i \pi D_i} \right)^{-1} (T_t - T_{mf}) \quad (2.18)$$

T_t : Température du tube ; (K)

D_i : Diamètre interne du tube ; (m)

e_t : Epaisseur du tube ; (m)

h_i : Coefficient de transfert par convection entre le tube et le fluide ; ($W/m^2 K$)

πD_i : Le périmètre mouillé de la conduite. (m)

En éliminant T_c de l'équation (2.17), l'expression du flux de chaleur utile récupéré par le fluide par unité de longueur dans la direction de l'écoulement est égale à :

$$d\phi_u = \frac{\frac{1}{U_c} [S(\theta) - U_c (T_{mf} - T_a)]}{\left[\frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{e_t}{k \pi D_i} \right] + \left[\frac{1}{U_c [D_e + F(\ell - D_e)]} \right]} \quad (2.19)$$

Qui peut s'écrire aussi sous la forme de

$$d\phi_u = \frac{[S(\theta) - U_c (T_{mf} - T_a)] [D_e + F(\ell - D_e)]}{1 + U_c \left[\frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{e_t}{k \pi D_i} \right] [D_e + F(\ell - D_e)]} \quad (2.20)$$

On peut aussi écrire $d\phi_u$ sous forme simplifiée [54], tel que :

$$\phi_u = A_c F' [S(\theta) - U_c (T_{mf} - T_a)] \quad (2.21)$$

$$\text{Avec } F' = \frac{\frac{1}{U_c}}{\ell \left[\frac{1}{[(\ell - D_e)F + D_e] U_c} \right] + \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{e_t}{k \pi D_i}} \quad (2.22)$$

F' : est le rapport de la résistance thermique au transfert entre la plaque et l'ambient sur la résistance thermique entre le fluide caloporteur et l'ambient, appelé facteur d'efficacité de la plaque absorbante.

2.3.2. DETERMINATION DES PERTES THERMIQUES GLOBALES

Les pertes thermiques dans le capteur tel que donné en équation 2.4 sont dues à la différence de température entre la plaque absorbante et le milieu ambiant. Ces pertes sont :

- Les pertes vers l'avant ;
- Les pertes vers l'arrière ;
- et les pertes latérales.

2.3.2.1. Pertes thermiques vers l'avant du capteur :

L'échange thermique par convection et rayonnement entre la vitre et l'absorbeur s'écrit [55] :

$$q_{av1} = A_c h_{cv} \left(T_p - T_v \right) + A_c \varepsilon_{cv} \sigma_s \left(T_p^4 - T_v^4 \right) \quad (2.23)$$

Où

T_v : La température moyenne de la vitre ;

h_{cv} : Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur ;

ε_{cv} : L'émissivité totale.

Avec :

$$\frac{1}{\varepsilon_{cv}} = \frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1$$

ε_p et ε_v : Etant respectivement les coefficients d'émissions pour l'infrarouge de l'absorbeur et de la vitre.

L'expression peut s'écrire aussi sous la forme suivante :

$$q_{av} = A_c \left(h_{cpv} + h_{rpv} \right) \left(T_p - T_v \right) \quad (2.24)$$

Avec

$$h_{rv} = \sigma_s \varepsilon_{pv} (T_p + T_v) (T_p^2 + T_v^2)$$

Par ailleurs, les pertes vers l'avant de la vitre vers l'ambient s'écrivent :

En négligeant l'énergie absorbée par la vitre [55], on a :

$$q_{av} = A_c (h_{cve} + h_{rve}) (T_v - T_a) \quad (2.25)$$

Avec h_{cve} : Coefficient des pertes par convection dû à la présence de vent [55].

$$h_{cve} = 5.7 + 3.8 V$$

V : Vitesse du vent.

Les pertes thermiques par rayonnement vers le ciel sont rapportées à la température ambiante, tel que :

$$h_{rve} = \varepsilon_v \sigma_s (T_{ciel} + T_v) (T_{ciel}^2 + T_v^2) \frac{T_v - T_{ciel}}{T_v - T_a} \quad (2.26)$$

h_{rve} : Coefficient des pertes par convection entre la vitre et l'environnement

Afin de simplifier la détermination des pertes vers l'avant, une formule empirique a été établie par Klein [55] pour des températures inférieure à 20° avec une erreur inférieure à 0.3 W/m²°C.

Cette formule s'écrit :

$$U_{av} = \left[\frac{N}{\frac{c}{T_p} \left(\frac{T_p - T_a}{N_v + f} \right)^a} + \frac{1}{h_{cva}} + \frac{\sigma_s (T_p + T_a) (T_p^2 + T_a^2)}{1} \right]^{-1} \frac{1}{(\varepsilon_p + 0,00591 N h_{cva} + S - N)} \quad (2.27)$$

$$a = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right)$$

$$c = \begin{cases} 520(1 - 0.000051\beta^2) & 0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ \\ 390 & \beta \geq 90^\circ \end{cases}$$

$$f = (1 + 0,089h_{cva} - 0,1166h_{cva}\varepsilon_c)(1 + 0,07866N)$$

$$h_{cva} = 5,7 + 3,8V$$

$$S = \left(\frac{2N + f + 0,133\varepsilon_c - 1}{\varepsilon_v} \right)$$

ε_p : Emissivité de l'absorbeur ;

N : Nombre de vitres ;

h_{cva} : Coefficient de transfert dû au vent ; (W/m^2K)

T_p : Température moyenne de la plaque ; (K)

V : Vitesse du vent ; (m/s)

C : Facteur tenant compte de l'inclinaison du capteur sur les coefficients de convection.

2.3.2.2. Pertes thermiques vers l'arrière du capteur

Les pertes vers l'arrière sont beaucoup plus faciles à évaluer. L'absorbeur est généralement bien isolé. Les pertes thermiques sont par rayonnement et par conduction-convection entre la face arrière du capteur et l'environnement.

On supposera que les faces intérieures et extérieures du capteur sont à la même température. L'échange thermique par conduction étant supérieur aux échanges thermiques par rayonnement et conduction-convection entre la face arrière et l'environnement [53]

Le coefficient de pertes arrière s'écrit alors [15] :

$$U_{ar} = \frac{1}{R_3} = \frac{k_{is}}{e_{ar}} \quad (2.28)$$

k_{is} : Conductivité thermique de l'isolant ; (W/m°C).

e_{ar} : Epaisseur de l'isolant arrière du capteur (m).

Souvent le capteur est intégré à la construction, ce qui entraîne une valeur faible de R_3 [53].

2.3.2.3. Pertes thermiques latérales du capteur

Les pertes thermiques latérales sont généralement faibles. Il est possible de les estimer en supposant que le transfert de chaleur est unidimensionnel.

Alors le coefficient de pertes correspondant par unité de surface de capteur est donc [15] :

$$U_{lat} = \frac{k_{is} A_{lat}}{e_{iso} A_c} \quad (2.29)$$

Avec $A_{lat} = 2 (L_c + l_c) e_c$

A_{lat} : Surface latérale du capteur ; (m²)

K_{is} : Conductivité thermique de l'isolant ; (W/m °C)

e_{lat} : Epaisseur latérale de l'isolant ; (m)

e_c : Epaisseur du capteur ; (m)

l_c : Largeur du capteur ; (m)

L_c : Longueur du capteur. (m)

2.3.3. RENDEMENT INSTANTANE DU CAPTEUR

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique récupérée par le fluide caloporteur (Q_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur (Q_{ab}).

L'expression globale du rendement instantané du capteur au premier ordre selon la norme EN 12975-2 s'écrit sous la forme suivante:

$$\eta = \frac{F' [S(\theta) - U_c (T_{mf} - T_a)]}{I_g} \quad (2.30)$$

Avec $S(\theta) = I_g (\tau\alpha)_{eff}$

Le rendement peut aussi s'écrire sous la forme suivante :

$$\eta_i = F' \left[(\tau\alpha)_{eff} - U_c \frac{(T_{mf} - T_a)}{I_g} \right] \quad (2.31)$$

$F' (\tau\alpha)_{eff}$: Rendement optique du capteur. Il représente l'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées.

$F' U_c$: Coefficient des pertes thermiques globales du capteur. Il représente la pente de cette courbe ; (W/m^2K).

2.4. CONCLUSION

Dans le présent chapitre, nous avons présenté la modélisation du capteur solaire plan, objet de la présente étude.

Les différentes expressions donnant les pertes thermiques du capteur ont été développées. La modélisation théorique a permis la production de la quantité d'énergie récupérée par le fluide en fonction de la température moyenne du fluide.

Enfin l'expression du rendement instantané est donnée en fin de chapitre.

CHAPITRE : 3

MODELISATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

3.1. INTRODUCTION	30
3.2. MODELISATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE.....	30
3.2.1. <i>Eclairement solaire global reçu sur le capteur.....</i>	<i>30</i>
3.2.2. <i>Détermination du coefficient de transmission –absorption effectif en fonction de θ.....</i>	<i>31</i>
3.2.3. <i>Angle d'incidence en fonction de l'inclinaison du capteur</i>	<i>37</i>
3.3. CONCLUSION.....	44

3.1. INTRODUCTION

L'angle d'incidence du soleil par rapport à un plan incliné joue un rôle important dans la détermination de la quantité d'énergie transmise par la vitre et absorbée par la plaque.

Etant donné que cet angle varie le long de la journée, les performances journalières fonction de cet angle varient simultanément. C'est pour cela que l'on introduit un facteur $K_{\tau\alpha}$ permettant la correction des performances le long de la journée.

Par ailleurs, l'angle d'incidence est fonction de différents angles définissant la position du soleil. Leurs influences sur l'angle d'incidence sont démontrées.

Enfin, nous allons donner l'expression de la quantité d'énergie absorbée en fonction de l'angle d'incidence modifié afin de déterminer le rendement le long de la journée du capteur.

3.2. MODELISATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

Le rayonnement absorbé par la surface d'un capteur solaire plan couvert par un vitrage est une fonction du rayonnement incident I_g , du coefficient de transmission du verre τ , du coefficient de réflexion ρ et du coefficient d'absorption de l'absorbeur α . Ces paramètres sont fonction de l'angle d'incidence θ .

Cette quantité de chaleur transmise et absorbée par le fluide caloporteur s'écrit :

$$S(\theta) = (\tau\alpha)_{\text{eff}}(\theta) I_g \quad (3.1)$$

Avec $(\tau\alpha)_{\text{eff}}(\theta)$: Coefficient de transmission-absorption effectif du capteur.

Et $I_g(\theta)$: Eclairement solaire globale reçu sur le capteur.

3.2.1. ECLAIREMENT SOLAIRE GLOBAL REÇU SUR LE CAPTEUR SOLAIRE

D'une façon générale, le rayonnement incident sur un plan incliné I_g , est donné par l'expression :

$$I_g = R_b I_b + F_1 I_d + F_2 (I_d + I_b) \quad (3.2)$$

Où :

I_b : Rayonnement direct instantané sur un plan horizontal ; (W/m^2)

I_d : Rayonnement diffus instantané sur un plan horizontal ; (W/m^2)

F_1 : Facteur de forme entre le capteur et le ciel ;

F_2 : Facteur de forme entre le capteur et le sol.

Lorsque le rayonnement global (direct et diffus) est mesuré directement sur le plan incliné du capteur, Il n y pas lieu de convertir le direct et le diffus à l'inclinaison du capteur.

3.2.2. DETERMINATION DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION –ABSORPTION EFFECTIF EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE

Le produit $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ résulte de multiples opérations de transmissions, d'absorptions et de réflexions entre la vitre et l'absorbeur. Il représente la fraction d'éclairement solaire transmise par le couvert et absorbée par la plaque.

3.2.2.1. Calcul du coefficient de transmission de la vitre

Pour estimer le coefficient de transmission de la vitre, il faut tenir de la réflexion, l'absorption et de la transmission du couvert.

A. Réflexion des radiations

Soit n_1 et n_2 les indices de réfraction de deux milieux différents. Un rayon qui frappe le milieu 1 avec un angle θ (angle d'incidence) sera réfracté à son tour d'un angle θ_r dans le milieu 2, tel que représenté sur la figure 3.1.

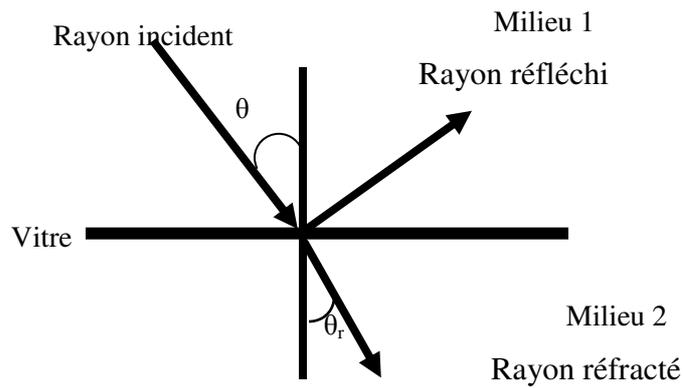


Figure 3.1 : Réflexion et réfraction du rayonnement incident

Les angles d'incidence et de réfraction sont liés par la loi de Descartes [2], tel que :

$$n_1 \sin(\theta) = n_2 \sin(\theta_r) \quad (3.3)$$

On peut écrire que :

$$\sin(\theta_r) = \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta) \quad (3.4)$$

Et on déduit que l'angle de réfraction est fonction de l'angle d'incidence.

La réflectivité directionnelle $\rho(\theta)$ est donnée par les formules de Fresnel [55], tel que :

$$\rho_{\parallel}(\theta) = \frac{\tan^2(\theta - \theta_r)}{\tan^2(\theta + \theta_r)} \quad (3.5)$$

Pour une onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence. La composante perpendiculaire s'écrit :

$$\rho_{\perp}(\theta) = \frac{\sin^2(\theta - \theta_r)}{\sin^2(\theta + \theta_r)} \quad (3.6)$$

La transmittivité dû à la réflectivité totale est égale à :

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} [\rho_{\parallel}(\theta) + \rho_{\perp}(\theta)] \quad (3.7)$$

B. Coefficient de transmission dû à la réflexion du rayonnement

En supposant qu'au niveau de la vitre, l'absorption est négligeable devant la transmission (température de la vitre est suffisamment froide), de multiples réflexions du rayon se font aux niveaux des deux surfaces intérieure et extérieure de la vitre [55].

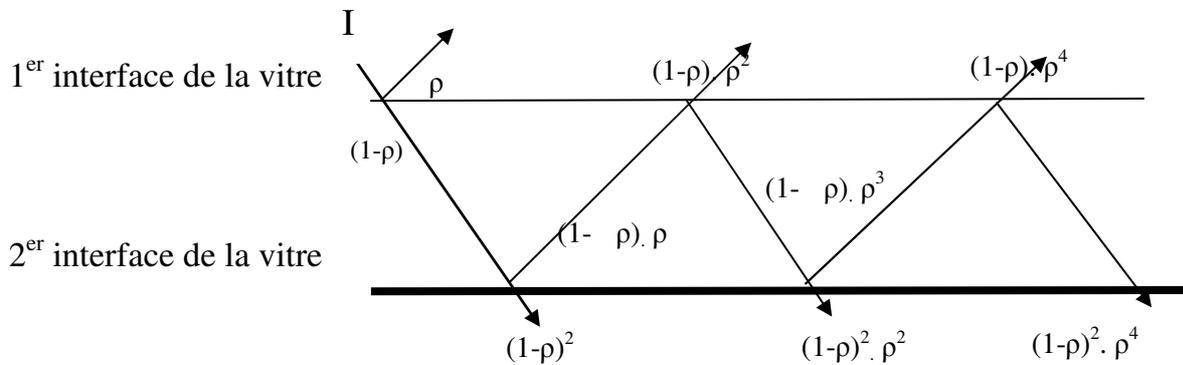


Figure 3.2 : Réflexion et réfraction multiples dans la vitre

En figure 3.2 sont schématisés les différents chemins empruntés par un rayon solaire incident sur un vitrage d'épaisseur e_v .

En effet, pour la face supérieure, le rayon I est réfléchi alors qu'une partie $(1-\rho)$ est transmise vers la face inférieure. Cette dernière se voit à nouveau réfléchi à un taux $\rho(1-\rho)$, alors que la partie transmise sera $(1-\rho)^2 \dots$

Pour avoir la composante perpendiculaire de la fraction totale transmise, qu'on note τ_{\perp} , il suffit de sommer toutes les quantités qui traversent la 2^{ème} interface de la vitre [55].

$$\tau_{\perp}(\theta) = (1-\rho_{\perp})2 \sum_{n=0}^{\infty} (\rho_{\perp}^{2n}) \quad (3.8)$$

n : nombre de réflexions

Cette dernière est une série géométrique de raison $q = \rho_{\perp}$, qui peut s'écrire :

$$\tau_{\perp}(\theta) = \frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + \rho_{\perp}} \quad (3.9)$$

En faisant le même raisonnement pour la composante parallèle, on obtient :

$$\tau_{\parallel}(\theta) = (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} (\rho_{\parallel}^{2n}) = \frac{1 - \rho_{\parallel}}{1 + \rho_{\parallel}} \quad (3.10)$$

La transmittivité totale de la vitre non absorbante, sera alors la moyenne arithmétique des deux composantes τ_{\parallel} et τ_{\perp} [55]:

$$\tau_{\rho}(\theta) = \frac{1}{2} [\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}] = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \rho_{\parallel}}{1 + \rho_{\parallel}} + \frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + \rho_{\perp}} \right] \quad (3.11)$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \left(\frac{\text{Tg}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Tg}^2(\theta + \theta_r)} \right)}{1 + \left(\frac{\text{Tg}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Tg}^2(\theta + \theta_r)} \right)} + \frac{1 - \left(\frac{\text{Sin}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Sin}^2(\theta + \theta_r)} \right)}{1 + \left(\frac{\text{Sin}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Sin}^2(\theta + \theta_r)} \right)} \right] \quad (3.12)$$

C. Coefficient de transmission dû à l'absorption du rayonnement τ_{α}

La transmittivité dû à l'absorption du rayonnement par la surface du verre est exprimée par la loi de Bouguer's [55] qui est basée sur la supposition que le rayonnement absorbé est proportionnel au flux local dans la vitre et à la distance x parcourut par le rayon dans la vitre :

$$\tau_{\alpha}(\theta) = \exp \left[\frac{-K_x e_v}{\cos(\theta_r)} \right] \quad (3.13)$$

K_x : Coefficient d'extinction supposé constant dans le spectre solaire. Il varie entre 4 m^{-1} et 32 m^{-1} pour le verre [56].

e_v : épaisseur de la vitre, (m).

En remplaçant l'angle θ_r par son expression en équation (3.4), le coefficient de transmission globale de la vitre sera le produit des transmittances partielles trouvées précédemment, à savoir :

$$\tau = \tau_a \tau_r \quad (3.14)$$

$$\tau(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\rho_{\parallel}}{1+\rho_{\parallel}} + \frac{1-\rho_{\perp}}{1+\rho_{\perp}} \right] \exp \left[\frac{-K_x e}{\cos(\theta_r)} \right] \quad (3.15)$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \left(\frac{\text{Tg}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Tg}^2(\theta + \theta_r)} \right)}{1 + \left(\frac{\text{Tg}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Tg}^2(\theta + \theta_r)} \right)} + \frac{1 - \left(\frac{\text{Sin}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Sin}^2(\theta + \theta_r)} \right)}{1 + \left(\frac{\text{Sin}^2(\theta - \theta_r)}{\text{Sin}^2(\theta + \theta_r)} \right)} \right] \exp \left[\frac{-K_x e}{\cos(\theta_r)} \right] \quad (3.16)$$

Avec θ_r est donné par l'équation (3.4)

3.2.2.2. Produit transmissivité -absorptivité effectif $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$

Le calcul du produit $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ est fonction des multiples réflexions qui se produisent entre l'absorbeur et la vitre comme représenté en figure 3.3.

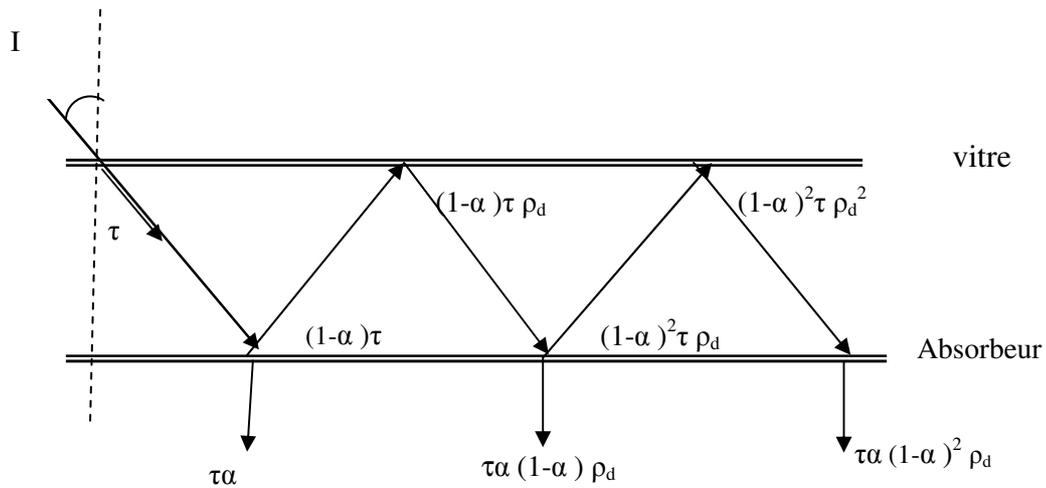


Figure 3.3 : Absorption du rayonnement solaire par l'absorbeur

Pour un flux direct (I_g) incident sur la surface du capteur, (τI) sera transmis et arrive à la surface de l'absorbeur, une quantité ($\alpha \tau I_g$) sera absorbé et une partie de ce flux sera à son tour réfléchi avec une portion égale à $(1-\alpha) \tau I$. Ce flux direct réfléchi par l'absorbeur sera un flux diffus qui sera réfléchi à son tour par le vitrage au taux de $(1-\alpha) \tau \rho_d I_g$.

ρ_d est le réflectivité hémisphérique moyenne du vitrage qui sera calculé par [15] :

$$\rho_d = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho(\theta) d\theta \quad (3.15)$$

En pratique ρ_d est souvent prise comme étant égal à $\rho(60^\circ)$ [55].

$$\rho_d(60^\circ) = \tau \rho(60^\circ) \quad (3.16)$$

Le produit $(\tau\alpha)$ sera la somme de toutes les quantités qui traversent la couverture transparente et absorbée par la plaque. On obtient :

$$(\tau\alpha)_{\text{eff}} = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} (1-\alpha)^n \rho_d \quad (3.17)$$

On remarque qu'on a une suite géométrique de raison $q = (1-\alpha)\rho_d$ donc :

$$(\tau\alpha)_{\text{eff}} = \frac{\tau\alpha(\theta)}{1-\rho_d(1-\alpha)} \quad (3.18)$$

Le coefficient d'absorption de la plaque est fonction de l'angle d'incidence, il est donné par l'expression suivante [57].

$$\alpha = \alpha_n (\cos(\theta))^{0.25} \quad (3.19)$$

Avec α_n : Coefficient à une incidence normale.

En remplaçant chaque paramètre dans l'équation (3.17), on obtient :

$$(\tau\alpha)_{\text{eff}} = \frac{\alpha_n (\cos(\theta))^{0,25} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta + \theta_r) - \sin^2(\theta - \theta_r)}{\sin^2(\theta + \theta_r) + \sin^2(\theta - \theta_r)} + \frac{\text{tg}^2(\theta + \theta_r) - \text{tg}^2(\theta - \theta_r)}{\text{tg}^2(\theta + \theta_r) + \text{tg}^2(\theta - \theta_r)} \right) \exp \left(\frac{-K_e}{\cos(\theta_r)} \right) \right]}{1 - \left[1 - (\alpha_n (\cos(\theta))^{0,25} \right] \rho_d} \quad (3.20)$$

$$\text{Avec } \theta_r = \frac{n_1}{n_2} \arcsin(\theta)$$

Alors $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ sera fonction seulement de θ .

3.2.3. ANGLE D'INCIDENCE EN FONCTION DE L'INCLINAISON DU CAPTEUR

3.2.3.1. Angle d'incidence

Le rayonnement solaire incident sur le plan d'un capteur solaire incliné est défini par les relations géométriques caractérisant la position du soleil par rapport au plan horizontal et incliné du capteur.

La figure 3.4 représente les angles situant la position du soleil par rapport à la terre.

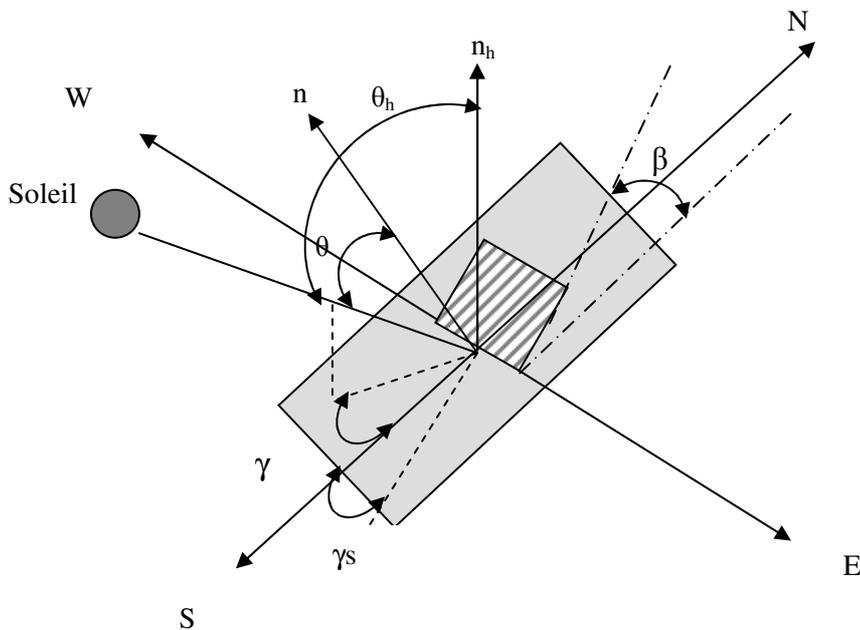


Figure 3.4 : Définition des angles caractérisant la position du soleil

Sur la figure 3.4, on définit :

n_h : La normale au plan horizontal ;

n : La normale au capteur plan ;

θ : Angle d'incidence formé par la perpendiculaire au plan du capteur ; (Degré)

δ : Déclinaison du soleil ; (Degré)

Φ : Latitude de lieu ; (Degré)

β : Angle d'inclinaison du capteur ; (Degré)

ω : Angle horaire ; (Degré)

γ : Azimut du soleil ; (Degré) ;

γ_s : Déviation azimutal. (Degré)

Sachant que :

- *Angle horaire ω* : Angle horaire est défini comme étant l'équivalent angulaire de l'arc de trajectoire compris entre le midi vrai et le soleil. Il augmente de 15° par heure, il est négatif avant midi TSV et positif l'après midi [52] et est égale à :

$$\omega = 15 (TSV-12) \quad (3.21)$$

$$TSV = T_u + 4 (L_s - L_g) + e_t$$

Avec : $e_t = 9.87 \sin (2j_d) - 7.53 (j_d) - 1.5 \sin (j_d)$.

Et $j_d = (n-81) (360/365)$.

T_u : Temps universel standard ;

L_s : Méridien standard du lieu (longitude) en degré.

e_t : Correction de l'équation de temps donnée par [58].

n : Nombre du jour dans l'année.

- *Déclinaison soleil γ* : Angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial. Il est donné par la relation [58]:

$$\gamma_s = 23,45 \sin\left[\frac{360}{365} (n+284)\right] \quad (3.22)$$

Avec n numéro du jour dans l'année.

- *Angle d'incidence* : Angle d'incidence θ est l'angle formé entre la direction du soleil et la normale au plan. Cet angle est déterminé à travers les cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales.

L'angle d'incidence sur un plan quelconque s'écrit [12]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta \sin \Phi \cos \beta - \sin \delta \cos \Phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \Phi \cos \beta \cos \omega + \\ \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.23)$$

Le capteur solaire plan objet de la présente étude est placé sur un site situé dans l'hémisphère nord du globe terrestre. Orienté face au sud, alors la déviation azimutale du capteur est nulle ($\gamma=0$).

En annulant l'azimut, l'équation (3.23) s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta \sin \Phi \cos \beta - \sin \delta \cos \Phi \sin \beta + \cos \delta \cos \Phi \cos \beta \cos \omega \\ + \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \cos \omega \end{aligned} \quad (3.24)$$

Après arrangement l'équation (3.24) se met sous la forme :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (\Phi - \beta) + \cos \delta \cos (\Phi - \beta) \cos \omega \quad (3.25)$$

Par ailleurs l'ensoleillement du capteur varie d'un site à autre. Il dépend essentiellement du lieu d'implantation de ce dernier. Il est fonction de la latitude du lieu (Φ).

La latitude du site de Ghardaïa est de $\Phi = 32.38^\circ$. En introduisant cette valeur dans l'équation précédente, elle s'écrit :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & 0.84 \sin \delta \cos \beta - 0.53 \sin \delta \sin \beta + 0.53 \cos \delta \cos \beta \cos \omega \\ & + 0.84 \cos \delta \sin \beta \cos \omega. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Avec $\sin \Phi = 0.84$ et $\cos \Phi = 0.53$

Elle peut s'écrire aussi sous la forme suivante :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (32.38 - \beta) + \cos \delta \cos (32.38 - \beta) \cos \omega \quad (3.27)$$

3.2.3.2. Influence de la déclinaison sur l'angle d'incidence

On étudie l'évolution de la déclinaison en fonction du numéro du jour. Les tests se sont déroulés les mois de septembre et octobre. Le numéro du jour varie dans la gamme de 244 à 304. En introduisant le numéro du jour dans l'équation (3.22). On peut déterminer l'évolution de $\cos(\delta)$ en fonction du numéro du jour tel que représentée en figure 3.5.

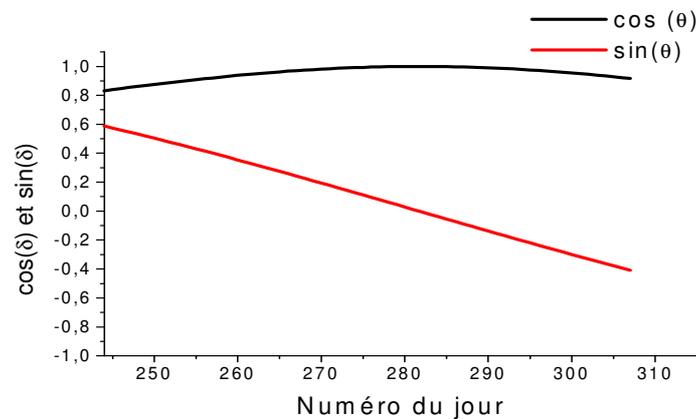


Figure 3.5 : L'évolution de la déclinaison en fonction du numéro du jour

On remarque que $\cos(\theta)$ varie peu en fonction du numéro du jour durant les deux mois de test. Par ailleurs, $\sin(\delta)$ varie entre la valeur de - 0.4 et + 0.4, ceci est dû au fait que les tests se sont déroulés avant et après l'équinoxe de l'automne (21 septembre).

Afin de montrer l'influence de la déclinaison du soleil sur l'angle d'incidence, on trace l'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de la déclinaison δ pendant les deux mois de mesure. Pour un capteur incliné à latitude du lieu et à midi TSV, l'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de la déclinaison est représentée en figure 3.6

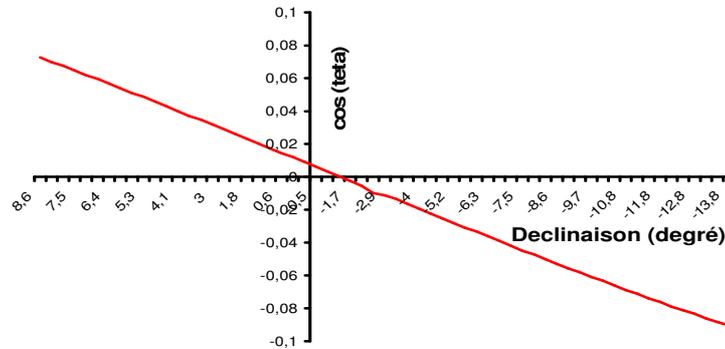


Figure 3.6 : Evolution de $\cos(\theta)$ en fonction de la déclinaison

On remarque que $\cos(\theta)$ varie peu par rapport à la variation de la déclinaison pendant la période des tests, car sa valeur varie entre 0,08 à -0,08. Les valeurs négatives sont dues au fait que les tests se sont déroulés avant et après l'équinoxe d'automne.

3.2.3.3. Influence de l'angle horaire sur l'angle d'incidence

Les tests se sont déroulés les mois de septembre et octobre, à midi TSV plus ou moins une heure. En utilisant l'équation (3.21), on déduit que l'angle horaire ω varie entre -15° et $+15^\circ$. L'évolution de $\cos \omega$ en fonction de l'angle horaire est représentée en figure 3.7

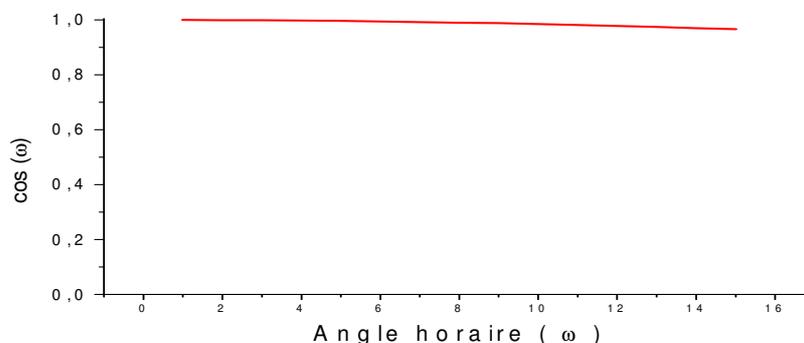


Figure 3.7 : L'évolution de $\cos(\omega)$ en fonction de l'angle horaire (ω)

On remarque que la valeur de $\cos(\omega)$ est presque constante égale à 0.9 toute au long de la période de test (midi TSV plus ou moins une heure).

L'angle d'incidence θ est fonction de $\cos(\omega)$. Afin de montrer l'influence de ce dernier sur $\cos(\theta)$, on trace l'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction $\cos(\omega)$ pour un capteur incliné à latitude de lieu et des tests se déroulent à l'équinoxe d'automne.

En figure 3.8, on montre l'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de $\cos(\omega)$.

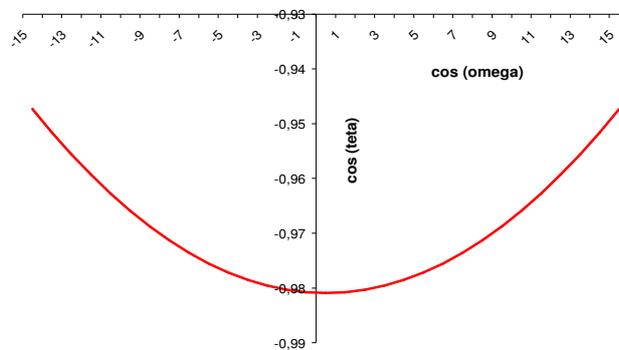


Figure 3.8 : L'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de $\cos(\omega)$

On remarque que $\cos(\delta)$ est presque constante avoisinant, sa valeur est entre -0.95 et -0.98 pour la période de test.

3.2.3.3. Influence de l'inclinaison du capteur sur l'angle d'incidence

Pour montrer l'influence de l'angle d'inclinaison du capteur sur l'angle d'incidence, on trace l'évolution de $\cos(\theta)$ pour plusieurs inclinaisons (10° , 30° , 45° et 60°), pour une déclinaison fixe et à midi TSV.

En figure 3.9 est tracé la variation de $\cos(\theta)$ en fonction de l'angle d'inclinaison β .

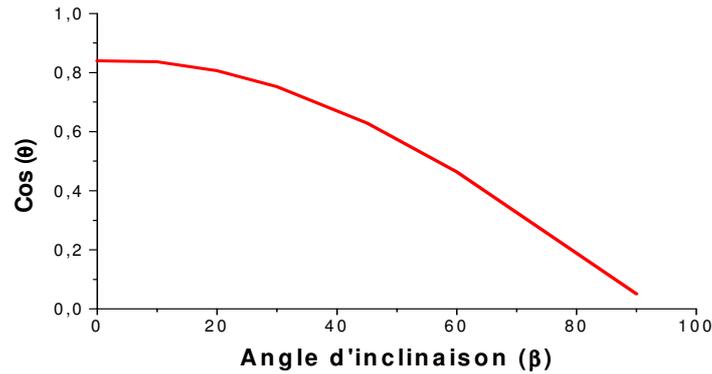


Figure 3.9 : L'évolution l'angle d'incidence en fonction de l'inclinaison du capteur

On remarque une forte influence de l'angle d'incidence sur l'inclinaison du capteur.

La valeur varie de 0,05 à 0,84. En effet, pour cette raison que les angles d'incidence imposés par la norme ont été choisis par rapport à l'inclinaison du capteur au premier lieu, et l'angle horaire en second lieu.

Les différentes variations des paramètres influencent sur l'angle d'incidence sont regroupées au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur l'angle d'incidence

variation	Déclinaison (δ)	Angle horaire (ω)	Inclinaison du capteur (β)	Cos (θ)
δ	-13,8° à 6,6°	0° (midi TSV)	32° (latitude du lieu)	-0,08 à +0,08
ω	0° (équinoxe)	-15° à +15°	32°	- 0,95 à +0,98
β	0° (équinoxe)	0° (midi TSV)	0° à 90°	0,05 à 0,84

1. Les paramètres $\cos(\delta)$ et $\sin(\delta)$ influent peu sur l'expression de $\cos(\theta)$.
Alors on peut conclure que l'influence de la déclinaison du soleil n'influe pas beaucoup sur l'angle d'incidence durant les deux mois de test.
2. On remarque $\cos(\theta)$ varie entre - 0,95 et + 0,98, son minimum est atteint à midi TSV, il varie peu en fonction de $\cos(\omega)$ ce qui indique la faible influence de l'angle horaire sur l'angle d'incidence autour de midi TSV.

3. Le tableau 3.1 montre que l'angle d'incidence est fortement influencé par l'angle d'inclinaison du capteur.

3.3. CONCLUSION

On peut conclure que l'inclinaison du capteur β est le paramètre essentiel dans la variation l'angle d'incidence (θ), contrairement aux autres paramètres (δ , ω et Φ) qui influent peu sur ce dernier durant la période des tests.

L'inclinaison du capteur sera l'outil qui permet le calcul des angles d'incidence imposés par la norme lors des tests.

CHAPITRE : 4

NORMES ET EXPERIMENTATION

4.1. INTRODUCTION.....	45
4.2. NORMES EXISTANTES.....	46
4.3. EXPERIMENTATION.....	47
4.3.1. <i>Présentation du banc d'essai selon différentes normes.....</i>	<i>47</i>
4.3.2. <i>Instruments de mesures</i>	<i>50</i>
4.3.3. <i>Déroulement des tests</i>	<i>51</i>
4.4. REALISATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	58
4.4.1. <i>Présentation du banc d'essai.....</i>	<i>58</i>
4.4.2. <i>Instrumentation de mesure.....</i>	<i>62</i>
4.4.3. <i>Montage du cadre.....</i>	<i>64</i>
4.5. DEROULEMENT DES TESTS EXPERIMENTAUX	64
4.5.1. <i>Détermination expérimentale de la superficie du capteur</i>	<i>64</i>
4.5.2. <i>Détermination expérimentale de la contenance en fluide.....</i>	<i>65</i>
4.5.3. <i>Régulation expérimentale du débit massique</i>	<i>65</i>
4.5.4. <i>Régulation de la température d'entrée du fluide</i>	<i>66</i>
4.5.5. <i>Mesure de l'angle d'incidence solaire.....</i>	<i>66</i>
4.5.6. <i>Conditionnement préalable aux essais</i>	<i>66</i>
4.5.7. <i>Etalonnage expérimental du banc d'essai.....</i>	<i>66</i>
4.5.8. <i>Test expérimentaux pour le calcul de la constante de temps</i>	<i>68</i>
4.5.9. <i>Test expérimentaux du rendement instantané.....</i>	<i>68</i>
4.5.10. <i>Test expérimentaux de l'angle d'incidence modifié.....</i>	<i>69</i>
4.6. CONCLUSION	71

4.1. INTRODUCTION

Divers standards et normes à usage local ou régional ont été mis en place par différents pays. Ils sont généralement inspirés des principaux standards, tel que les normes ASHRAE, Européenne et Australienne.

Toutes ces méthodes sont utilisées pour la détermination des performances instantanées d'un capteur solaire. Elles sont basées sur deux méthodologies différentes, à savoir :

- La méthode calorimétrique ;
- La méthode basée sur l'établissement d'un bilan thermique, en régime quasi-permanent sur un volume de contrôle fixé par les limites du collecteur.

Les différentes normes fournissent les méthodes d'essai et les méthodes de calcul permettant de déterminer les performances thermiques des capteurs solaires à circulation de liquide en régime stationnaire et quasi-stationnaire. Elles définissent les méthodes de réalisation d'essais à l'extérieur dans des conditions d'éclairement solaire et de vent naturel, ainsi que les méthodes de réalisation d'essais à l'intérieur dans des conditions de simulation de l'éclairement solaire et du vent.

Elles présentent également les types d'essai et des méthodes de calcul permettant de déterminer les paramètres de performances thermiques des capteurs solaires à circulation à liquide en régime aussi bien stationnaire que dynamique, dans des conditions climatiques variables.

Les effets qui influent sur les performances instantanées du capteur sont :

- La vitesse du vent ;
- Le rayonnement global ;
- La température ambiante ;
- ainsi que la capacité thermique.

Les principales caractéristiques à déterminer lors des essais en extérieur sont :

- La constante de temps ;
- Le rendement instantané en conditions quasi-stationnaire ;
- L'angle d'incidence modifié.

Dans le présent chapitre une présentation des principales normes existantes est donnée. Le banc d'essai mis en place pour les tests expérimentaux effectués en boucle fermée, réalisée auprès de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa est décrit. L'instrumentation utilisée lors des tests ainsi que la démarche adoptée pour la détermination du rendement instantané du capteur et l'effet de l'angle d'incidence sur les performances d'un capteur solaire plan est présenté.

4.2. NORMES EXISTANTES

Les principaux standards récents destinés aux tests des capteurs solaires sont :

- ASHRAE 93-2003 ;
- EN-12973-2-2006 ;
- ISO 9806 ;
- AUSTRALIEN STANDARD 2535-198.

Généralement ces standards s'adressent aux capteurs solaires plans à l'exception du dernier qui peut tester les capteurs sous vides.

Le banc d'essai mise en place pour les tests expérimentaux est soit en boucle fermée ou ouverte, dans des conditions d'éclairement naturel (à l'extérieur) ou de simulation (à l'intérieur). Les standards peuvent être utilisés pour des régimes quasi stationnaire ou dynamique.

Ils diffèrent l'un de l'autre par la conception du banc d'essai, par les instruments de mesures ou à travers la représentation du rendement instantané, de la constante de temps et du facteur d'angle d'incidence modifié.

4.3. EXPERIMENTATION

4.3.1. BANC D'ESSAI SELON DIFFERENTES NORMES

Le banc d'essai par les différents standards proposés est soit en boucle ouverte ou fermée, selon le type de capteur solaire à tester, et le niveau de température visé.

4.3.1.1. Banc d'essai en boucle fermée

Généralement la boucle fermée est destinée pour les capteurs opérant à des températures pouvant atteindre ou dépasser la température d'ébullition du fluide caloporteur utilisé. On est tenu d'opérer en surpression à l'aide d'un banc d'essai en boucle fermée. En figure 4.1 est donnée la représentation du banc d'essai en boucle fermée selon les normes EN 12975-2 [22].

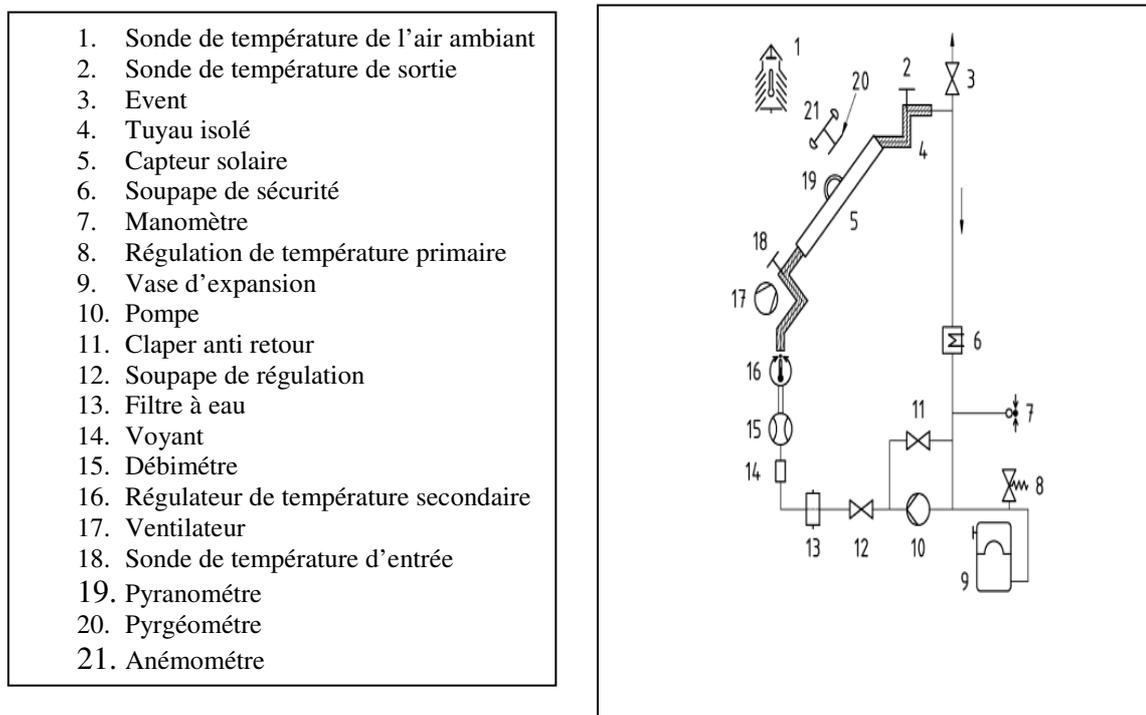


Figure 4.1 : Présentation d'un banc d'essai en boucle fermée selon les normes EN 12975-2

Il est composé principalement des éléments suivants :

A. Un circuit primaire composé de :

- Un capteur solaire plan et des flexibles bien isolés qui assurent le raccordement au capteur ;
- Une pompe permettant la circulation du fluide caloporteur ;
- Une unité de préchauffage isolé dans laquelle est plongée des thermoplongeurs ; et où se trouve un échangeur de chaleur qui assure la régulation thermique de la température d'entrée ;
- Un vase d'expansion pour la dilatation du fluide caloporteur pour de hautes températures et hautes pressions ;
- Un filtre à eau composé de petits cristaux, qui permet d'assurer l'élimination de toute impureté qui peut fausser les mesures ou détériorer la pompe;
- Une tuyauterie, généralement bien isolée qui assure le raccordement de tous les composants du circuit ;
- Un purgeur d'air installé au plus haut niveau du circuit afin de dégazer tout air et d'assurer une circulation parfaite du fluide ;
- Un régulateur de température qui assure le maintien des niveaux de température d'entrée lors des tests;
- Un système de By-pass constitué par une vanne qui assure le réglage du débit massique imposé par les différents standards.

B. Un circuit secondaire ouvert, alimenté par le réseau de la ville. Un by- Pass et des vannes de régulation sont installées pour l'évacuation du flux collecté.

C. Un échangeur de chaleur qui sert à relier les deux circuits.

4.3.1.2. Banc d'essai en boucle ouverte

Un banc d'essai en boucle ouverte, représenté en figure 4.2 se compose essentiellement de :

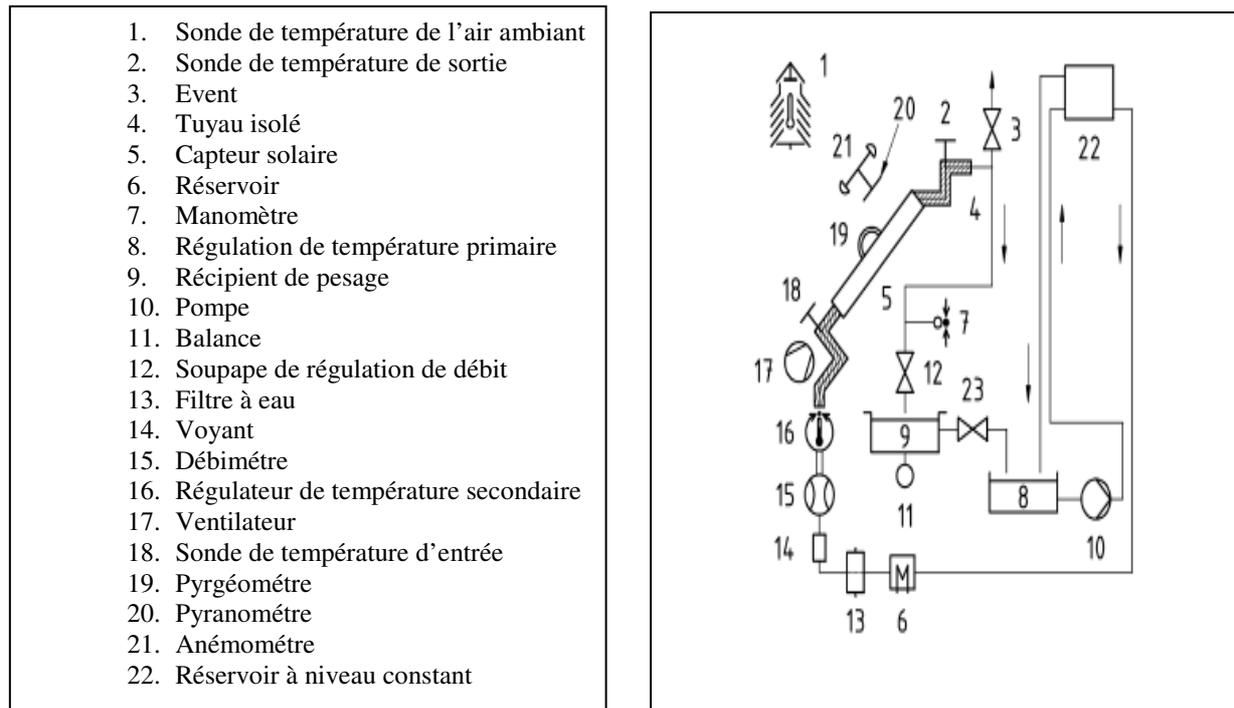


Figure 4.2 : Présentation d'un banc d'essai en boucle fermée selon les normes EN 12975-2 [22]

- A. Un réservoir tampon calorifugé dans lequel le fluide caloporteur stocké, de capacité suffisante pour toute la durée des essais, est porté à la température de test à l'aide de résistances électriques plongées dans ce réservoir.
- B. Un second réservoir qui assure l'alimentation du capteur, placé à une hauteur suffisante. Il permet le maintien d'un débit constant pendant toute la durée de test.
- C. Une pompe de refoulement alimentant le réservoir de tête, à partir du stockage tampon.

4.3.1.3. Particularités des bancs d'essai selon les standards

Le banc d'essai proposé par les standards ASHRAE et Européen sont presque identiques. Il est à signaler une légère différence portant sur la position du pyranomètre par rapport au capteur (l'un au milieu et l'autre au niveau le plus haut). On note aussi la présence d'un ventilateur artificiel imposé uniquement par le standard européen. Par ailleurs la position des composants dans le circuit (le filtre à eau, le Bay-Pass ...) est différente d'un standard à un autre. Le standard Australien différent des autres standards, à travers une particularité essentielle qui est l'existence du réservoir

Tampon et de la mesure globale du produit (m Cp). En effet ce standard permet le test des capteurs solaires à hautes températures.

4.3.2. INSTRUMENTS DE MESURES

Les instruments utilisés lors des tests doivent répondre à des spécifications techniques (précision, stabilité et incertitude) bien définies. L'instrumentation utilisée lors des tests est généralement constituée de :

- **Pyranomètre** : Il est utilisé pour mesurer le rayonnement global. Il doit répondre aux spécifications suivant les classes telles qu'illustré dans le tableau 4.1

Tableau 4.1 : Comparaison entre les incertitudes du pyranomètre [47]

Désignation	ASHRAE 93	EN 12975-2:2006	
Sensibilité (W/m ²)	+/- 4	+/-1 (Classe 1)	+/-5 (Classe 2)
Stabilité (%)	+/-1	+/-1 (Classe 1)	+/-2 (Classe2)
Compensation de température (%)	+/-1	+/-1 (Classe1)	+/-2 (Classe2)
Réponse spectrale (%)	+/-1	+/-1 (Classe1)	+/-2 (Classe2)
Linéarité (%)	+/-1	+/-1 (Classe1)	+/-2 (Classe2)
Effet cosinus (%)	+/-1	+/-3 (Classe1)	+/-5÷7 (Classe2)

- **Thermocouples** : Ils sont utilisés pour mesurer la température d'entrée et de sortie du capteur. Ils sont généralement du type K, J ou T. Ils doivent avoir une fidélité et une précision selon les standards utilisés.

- **Thermopile** : Elle est formée d'un ensemble de thermocouples en série, reliant l'entrée et la sortie du capteur. Elle sert à mesurer l'écart de température ($\Delta T = T_s - T_e$) avec grande précision, elle doit avoir une incertitude maximum.

- **Débitmètre** : Il sert à mesurer et à régler le débit massique dans le circuit. Son incertitude est conforme aux normes utilisées.

- **Anémomètre** : Il sert à la mesure de la vitesse du vent.

Chaque instrument de mesure a une marche de tolérance.

Le tableau 4.2 reprend les tolérances maximales que les différents standards ont fixées pour les instruments.

Tableau 4.2 : Caractéristique des instruments de mesure recommandés par les standards [47]

Instrument	ASHRAE	Européen	Australien
Thermocouple T_e, T_s	+/- 0.2 K	+/- 0.1 K	+/- 0.05 K
Thermopile	+/- 0.1 K	+/- 0.1 K	+/- 0.07 K
Thermocouple T_a, T_s	+/- 0.5 K	+/- 0.5 K	+/- 0.1 K
Pyranomètre	Classe 1	Classe 1 ou 2	Classe 2
Anémomètre	+/- 0.8 m/s	+/- 0.5 m/s	+/- 0.8 m/s
Débit mètre	+/- 1%	+/- 1%	+/- 0.5 %

4.3.3. DEROULEMENT DES TESTS

Pour que le test soit considéré comme valable, une série de conditions assurant un régime permanent ou quasi permanent doivent être satisfaites.

4.3.3.1. Condition de test

Avant le début du test, le capteur doit être exposé pendant trois jours à l'éclairement solaire à une incidence journalière moyenne $> 4722 \text{ Wh/m}^2$. Il doit être incliné à la latitude du lieu et le fluide caloporteur doit circuler pendant au moins 15mn à la température d'épreuve pour assurer les conditions du régime quasi-permanent.

Chaque standard impose ses propres conditions de test.

- Pour le standard ASHRAE, les tests doivent être autour de midi solaire. La durée du test doit être au moins égale à la constante de temps du capteur et dans tout les cas supérieure à cinq minutes. Durant cette période les paramètres climatiques et radiométriques doivent vérifier les conditions stipulées par le standard.
- Pour le standard Européen la période de mesure s'étale de midi à +/- 40° d'incidence. La durée de test est prolongée jusqu'à 30 mn.
- Pour le standard Australien la durée de test est réduite à 5mn (2 à 3 fois que met le fluide caloporteur pour décrire son circuit).

Lors de ces tests, on procède aux vérifications des fluctuations des variables θ , T_a , I_g , V , m et $T(s)$ dans la limite tolérée par les standards tel que donné au tableau 4.3.

Tableau 4.3: Condition des paramètres pendant les tests [47]

Paramètres	ASHRAE	EN 12975	Australienne
θ (°)	-30° à +30°	40° à +40°	0°
(T_s-T_e) (°C)	-----	1.5 à 15	>5
T_a (°C)	30°	5° à 30°	-----
I_g (W/m ²)	> 790W/m ²	> 750W/m ²	-----
m (kg/s.m ²)	0.02 +/- 10%	0.02 +/- 10%	0.01 à 0.02
V (m/s)	< 4.5	1.5 à 5.5	-----
$T(s)$	k ou >5 mn	3 mn ou 4k	k+2f

f : Temps mis pour par le fluide pour décrire la boucle.

Pour atteindre le régime stationnaire et quasi-stationnaire, il y a de nombreuses conditions à ne pas dépasser lors de la période d'essai sur les variations maximales des paramètres mesurés

Les différents standards mis en place définissent les gammes de variations de ces paramètres tels que spécifiés au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Condition définissant le régime permanent ou quasi permanent [47]

Grandeur	ASHRAE	EN 12975	Australienne
ΔT_e	+/- 0.1 K	+/- 0.1 K	+/- 0.05 K
$\Delta(T_a-T_e)$	+/- 0.05 K	+/- 0.1 K	+/- 0.07 K
ΔT_a	+/- 1 K	+/- 1.5 %	+/- 0.1 K
ΔI_g	-	+/- 50 W/m ²	+/- 5 W/m ²
$\Delta m/m$	+/- 1 %	+/- 1%	+/- 0.5 %

4.3.3.2. Nombre de points de mesures

Si le capteur est exposé à un ensoleillement régulier de 1000 W/m², avec une température extérieure de 30°C, sans soutirage, un équilibre entre apport d'énergie et déperditions thermiques va s'établir. La température maximale atteinte est appelée température de stagnation.

Le standard ASHRAE impose 04 points de mesure pour la température d'entrée, égale à :

- 10% de la différence entre la température de stagnation et la température ambiante ;
- 30% de la différence entre la température de stagnation et la température ambiante ;
- 50% de la différence entre la température de stagnation et la température ambiante ;
- 80% de la différence entre la température de stagnation et la température ambiante.

Chaque point devant être relevé quatre fois, deux avant midi et deux après midi solaire, soit un totale de seize points.

Pour le standard Européen les mesures sont rapportées à la température moyenne du fluide, tel que :

- $T_i = T_a$
- $T_i = T_a + 20^\circ$
- $T_i = T_a + 40^\circ$
- $T_i = T_a + 60^\circ$

Chaque point est relevé quatre fois, deux avant midi et deux après midi, soit un total de seize points.

Le standard australien définit 3 gammes de mesures en fonctions de l'axe des abscisses (température moyenne logarithmique).

4.3.3.3. Constante de temps

La constante de temps représente le temps nécessaire pour que le capteur réagisse aux changements des conditions de l'environnement ou de fonctionnement. Ceci peut être très important pendant les journées où les conditions d'éclairement sont variables (journées avec irradiation diffuse élevée, nuage).

La constante de temps du système mesure, en termes de temps, la capacité calorifique du système. Elle dépend, en général, de la construction du collecteur, des matériaux utilisés, de la chaleur du fluide caloporteur, du facteur d'extraction de chaleur, du débit du fluide et évidemment de la température de fonctionnement.

Les tests portant sur la détermination de la constante peuvent être exécutés selon le standard utilisé, soit en phase de réchauffement (recommandation Européenne) soit en phase de refroidissement (recommandation ASHRAE).

Les tests selon le standard ASHRAE doivent être exécutés autour de midi TSV (incidence normale), où l'éclairement global doit être supérieur à 790W/m^2 .

La procédure consiste à couvrir avec une couverture réfléchissant le capteur. Le fluide caloporteur circule dans le circuit jusqu'à stabiliser la température de sortie du fluide $T_s = T_a \pm 1^\circ\text{C}$. Cette température est stabilisée ($\Delta T < 0.5^\circ$ durant 15 minutes), le capteur est brusquement voilé et les températures T_s , $(T_s - T_e)$, l'éclairement I_g et le temps t sont enregistrés.

La constante de temps correspond au temps nécessaire pour que l'écart de température $(T_s - T_a)$ perde 37% de sa valeur initiale. La variation de ΔT en fonction du temps est tracée.

Pour le standard Européen, l'éclairement solaire doit être supérieure 750W/m^2 . Le fluide caloporteur circule dans le circuit jusqu'à stabiliser la température moyenne du fluide à $T_{mf} = T_a \pm 1^\circ\text{C}$. Le capteur étant couvert par une surface réfléchissante (ou tourner vers le nord). Une fois cette température stabilisé ($\Delta T < 0.5^\circ\text{C}$ durant 15 minute), le capteur est brusquement découvert (ou tourner rapidement vers le sud). Les mêmes paramètres sont enregistrés et le ΔT est tracé fonction du temps.

La constante de temps est alors égale au temps nécessaire pour que le capteur atteigne 63% de l'échauffement maximal.

4.3.3.4. Angle d'incidence modifié

Le facteur de correction du produit effectif transmissivité- absorptivité $K_{\tau\alpha}$ est défini comme le rapport du rendement instantané à une incidence quelconque sur le rendement à une incidence normale. Il permet de calculer le rendement instantané à n'importe quelle incidence de la journée.

$$K_{\tau\alpha} = \frac{\eta(\theta)}{\eta(\theta = 0)} \quad (4.1)$$

La méthodologie de calcul de l'angle d'incidence est pratiquement identique d'un standard à l'autre. La différence réside dans la procédure de test.

La température T_e devant être égale à $T_a \pm 1\%$.

Le standard ASHRAE recommande d'effectuer les tests suivants :

- Trois (03) relevés avant midi à une incidence de 30°, 45°, et 60° ;
- Trois (03) relevés après midi aux mêmes angles ;
- Deux (02) relevés à un angle d'incidence nul.

Pour le standard Européen la différence réside au niveau du nombre de points de mesures. Seul quatre points sont suffisants:

- Un (01) point avant midi TSV, $40^\circ < \theta < 50^\circ$;
- Deux (02) points vers midi TSV, $0^\circ < \theta < 15^\circ$;
- Un point (01) après midi TSV, $40^\circ < \theta < 50^\circ$.

4.3.3.5. Rendement instantané du capteur :

Le rendement instantané du capteur selon le standard ASHRAE est rapporté à la surface globale du collecteur. Il est en fonction de la température d'entrée du fluide.

$$T^* = \frac{T_e - T_a}{I_g}$$

T_e : Température d'entrée du fluide ;

T_a : Température ambiante.

L'expression du rendement est représentée sous forme d'un polynôme du 1^{er} degré.

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* \quad (4.2)$$

η_0 : Rendement optique du capteur.

a_1 : Coefficient caractérisant les pertes thermiques du capteur ; (W/m^2K)

Pour le standard Européen EN 12975-2, la relation exprimant le rendement instantané du capteur est rapporté à la surface d'ouverture du collecteur ou celle de l'absorbeur. Elle est fonction de la température moyenne du fluide (moyenne arithmétique).

$$T^* = \frac{T_{mf} - T_a}{I_g}$$

Avec
$$T_{mf} = \frac{T_e + T_s}{2} .$$

L'expression du rendement est un polynôme du deuxième degré s'écrit sous forme:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 T_m^{*2} \quad (4.3)$$

η_0 : Rendement optique du capteur ;

a_1 : Coefficient de pertes thermique au premier ordre ; (W/m^2K)

a_2 : Coefficient de pertes thermique au deuxième ordre ; ($W/m^2 K^2$).

Le standard Australien se base sur une relation exprimant le rendement instantané du capteur rapporté à la surface d'ouverture du collecteur, fonction de la température moyenne logarithmique du fluide [46] tel que :

$$X = \frac{T_f' - T_a}{I_g} \quad \text{avec} \quad T_f' = T_s + T_e - \frac{T_e + T_s}{\text{Ln}\left(\frac{T_s}{T_e}\right)} \quad (4.4)$$

L'expression du rendement est un polynôme de la forme suivante :

$$\eta = \eta_{ob}(1 - f_d) + \eta_{od} - (a + bV)X - (c + dV)(T_f' - T_a)X - (e + fT_f') \frac{(T_f'^4 - T_c^4)}{T_f' - T_a} X \quad (4.5)$$

T_f' : Température moyenne logarithmique du fluide; (K)

T_c : Température du ciel ; (K)

V : Vitesse du vent ; (m/s)

f_d : Rapport de la radiation diffuse sur la radiation globale ;

η_{ob} : Rendement optique de la radiation directe ;

η_{od} : Rendement optique de la radiation diffuse ;

a, b, c, d, e et f : Paramètres caractérisant les pertes thermiques.

Au tableau 4.5 sont reportées les conditions de calcul du rendement instantané du capteur solaire selon les différentes normes.

Tableau 4.5 : Comparaison entre les différents standards

Norme	Référence	Modèle	ΔT
ASHRAE 93-86	Hors- tout	Linéaire	$\frac{T_e - T_a}{I_g}$
Européenne	Absorbeur Ouverture	Au carré	$\frac{T_{mf} - T_a}{I_g}$
Australienne	Ouverture	Au carré	$T_p = \frac{T_f' - T_a}{I_g}$ $T_{mf} = T_s + T_e - \frac{T_s + T_e}{\text{Ln}\left(\frac{T_s}{T_e}\right)}$

La norme Australienne est généralement plus exigeante et plus draconienne par rapport aux autres normes mais elles ne donnent pas beaucoup de précision sur la qualité de mesure. Elle dispose d'un champ d'application très étendu pour différents types de capteur solaires, en particulier les capteurs sous vide. Par contre les normes ASHRAE sont les plus larges, sauf que pour les mesures du rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent sont plus ou moins exigeantes.

On remarque que chaque standard est adapté aux conditions propres à sa région et qu'ils diffèrent les uns des autres par le nombre de point de mesures.

4.4. REALISATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

4.4.1. PRESENTATION DU BANC D'ESSAI

Le banc d'essai a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa. Un site situé au sud Algérien à une latitude $32,38^\circ$, une longitude de $3,81^\circ$ et une altitude de 450m. Il est caractérisé par un ensoleillement très important, avec une irradiation moyenne journalière estimée à 6000Wh/m^2 , une durée d'insolation d'environ 3000 heures par an et un indice de clarté K_t moyen estimé à 0,75 [59].

Le banc d'essai est monté en boucle fermée selon les normes européenne EN 12975-2. Il est composé essentiellement de 3 circuits :

A. Un circuit primaire composé de :

- Un capteur plan solaire à un seul vitrage représenté en la figure 4.3, dont la surface totale est égale à $2,6\text{ m}^2$, et la surface d'ouverture égale à $2,4\text{ m}^2$. Il est monté sur une structure rigide en acier réglable à plusieurs niveaux d'inclinaison de 0° , 32° , 45° , 60° et 90° . La conception et la forme de l'absorbeur, sont présentées au chapitre 2.



Figure 4.3 : Représentation du capteur solaire plan

Les caractéristiques du capteur sont données au tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Caractéristiques du capteur [60]

Paramètre	Caractéristique
Cadre extérieur	Profile d'aluminium anodise.
Dos du capteur	Tôle galvanisée \varnothing 0,6 mm
Isolation arrière	Laine de roche, épaisseur = 40 mm.
Isolation latérale	Laine de verre, épaisseur = 20 mm
Absorbeur	Ailette, en cuivre \varnothing = 0.2mm sélectif à base de titane
Tuyaux de l'absorbeur	Tuyaux en cuivre, \varnothing 10 et \varnothing 22
Couverture	Verre Trempe, épaisseur = 4 mm
Matériel d'étanchéité	EPDM et Silicone.

- Une Pompe à eau représentée en la figure 4.4, qui joue le rôle d'un circulateur du fluide caloporteur dans le circuit.



Figure 4.4 : Le circulateur

Ses principales caractéristiques sont citées dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Quelques caractéristiques de la pompe

Paramètre	Caractéristique
Marque	SALMSON
Plage de température	10°C à +110°C
Température ambiante	max +40°C
Pression minimum	1.5 m (0.15Bar).
Débit maximum	0 m ³ /h - 2.5m ³ /h (50Hz)
Puissance	17W- 48W 0.21A

- Un débit mètre de Marque KDG 1100 Burgess Hill représenté en la figure 4.5. Il sert à mesurer et à régler le débit imposé par le standard. Sa plage de mesure varie de 0 g/s jusqu'à 0.060 g/s.



Figure 4.5 : Le débit mètre

- Un vase d'expansion de marque MAAT qui sert à absorber tout le volume dû à la dilatation du fluide caloporteur. Il est représenté en la figure 4.6.



Figure 4.6 : Le vase d'expansion

Le vase d'expansion répond aux caractéristiques mentionnées dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Différents caractéristiques du vase d'expansion

Elément	Caractéristiques
Capacité	24 litres
Pression max	3.9 Bar
Plage de température	-10°C à 108°C.

- Un Purgeur situé dans le niveau le plus haut du capteur comme représenté en figure 4.7. Il sert à dégazer tout l'air se trouvant dans le circuit. Sa pression maximale est de 4 bars.



Figure 4.7 : Le purgeur

- Un filtre à eau formé par de petits cristaux comme représenté en figure 4.8. Il est utilisé pour éliminer toutes impuretés se trouvant dans le circuit.



Figure 4.8 : Le filtre a eau

B. Un circuit secondaire ouvert représenté en la figure 4.9. Il est alimenté par le réseau de ville, et commandé par un By- Pass et des vannes de régulation. Il sert à l'évacuation du flux collecté.



Figure 4.9 : Représentation du circuit secondaire

C. Un échangeur de chaleur qui sert à relier les deux circuits.

4.4.2. INSTRUMENTATION DE MESURE

4.4.2.1. Thermocouples

Trois mesures de température sont nécessaires pour les essais du capteur solaire. Il s'agit de la température du fluide à l'entrée, à la sortie du capteur et la température de l'air ambiant.

Ces températures sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K (Alumel – Chromel) représentés en la figure 4.10, leurs précisions est de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, sont conformes aux normes EN 12975-2. Ils sont plongés dans des doigts de gant qui baignent dans de l'huile minérale.



Figure 4.10 : Un thermocouple de type K

4.4.2.2. Thermopile

La thermopile représentée en la figure 4.11 est composée de trois thermocouples de type K montés en série conformément à la norme afin de diminuer l'incertitude de mesure de la différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur.



Figure 4.11 : Une thermopile

4.4.2.3. Pyranomètre

Un pyranomètre de Classe I (de type Kipp et Zennen) est monté dans le même plan que l'ouverture et à mi-hauteur du capteur. Le pyranomètre et les conducteurs émergents du raccord sont protégés afin de minimiser l'échauffement solaire des connexions électriques. Le pyranomètre utilisé est représenté en figure 4.12.



Figure 4.12 : Un pyranomètre de type Kipp et Zennen

4.4.2.4. Un anémomètre manuel

Il est utilisé pour la mesure de la vitesse du vent, ou les valeurs sont affichées instantanément.

4.4.2.5. Une unité d'acquisition

Une unité d'acquisition de marque Fluke Hydra à 20 entrées tel que représentée en la figure 4.13 est utilisée. Elle est pilotée par un ordinateur à travers une interface RS 232. Les valeurs sont enregistrées toutes les cinq minutes. Les mesures sont transférées chaque jour sur ordinateur, sont traitées et sélectionnées selon les conditions de test imposé par la norme à l'aide d'un logiciel implanté sur l'ordinateur (Hydra Starter Package, Version 3.1).



Figure 4.13 : Représentation de l'acquisition de données

L'unité d'acquisition, la pompe, et le débit mètre sont placés dans un abri (laboratoire) situé au dessous de la structure comportant le capteur solaire plan.

Ce dernier étant installé sur la terrasse, orienté vers le sud. Le laboratoire est maintenu à une température de confort à l'aide d'une climatisation pour éviter le risque d'échauffement de matériel de mesure.

4.4.3. MONTAGE DU CADRE

Une structure de fixation à ciel ouvert est utilisée, pour permettre à l'air de circuler librement à l'avant et à l'arrière du capteur. Elle est aussi montée de sorte que son bord inférieur se situe au moins à 0,5 m au-dessus du sol.

Le banc d'essai est positionné tel qu'aucune ombre ne tombe sur le capteur durant les essais. Le capteur est orienté tel que le facteur d'angle d'incidence du capteur varie de moins de 2 % par rapport à l'incidence de mesure comme le stipule la norme.

Le capteur n'est aucunement influencé par le rayonnement thermique provenant des alentours (cheminée, tour de refroidissement, conduit d'évacuation de gaz chauds).

4.5. DEROULEMENT DES TESTS EXPERIMENTAUX

4.5.1. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA SUPERFICIE DU CAPTEUR

La superficie (superficie hors ou superficie d'entrée) est mesurée avec une incertitude conforme au standard EN 12975-2. Sa mesure est effectuée à une température du capteur entre 10°C et 30°C.

Les dimensions du capteur mesurées sont :

- Dimensions (globale) : 205 mm X 128 mm.
- Dimensions (ouverture) : 198.5mm X 121 mm.

Le calcul de la superficie a donné les résultats suivants :

- Superficie (globale) : 2.6 m²
- Superficie (d'ouverture) : 2.3 m²

4.5.2. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA CONTENANCE EN FLUIDE

La contenance en fluide du capteur est déterminée par pesée du capteur vide et plein. On procède au remplissage et à la vidange du capteur afin de déterminer la masse de fluide qu'il contient. Lors de l'opération la température du fluide doit correspondre à la température ambiante à $\pm 2^\circ$ C près. Les résultats ont donné :

- Poids à vide : 51 kg.
- Poids brut : 53 kg.

Ce qui indique que la contenance du fluide est de 2 kg.

Le fluide caloporteur utilisé pour les essais est de l'eau. C'est un fluide dont la capacité thermique massique et la masse volumique sont connus à $\pm 1\%$ dans la plage de températures du fluide utilisé lors des essais.

4.5.3. REGULATION EXPERIMENTALE DU DEBIT MASSIQUE

La pompe et le débit mètre et la vanne du bay-Pass assurent le maintien du débit massique dans le capteur à 1% en dépit des variations de la température.

Le débit massique imposé par la norme est de 0,02 Kg/s.m². Sachant que la surface globale du capteur est de 2.6 m², alors le débit de tests est de :

$$\dot{m} = 0.02 \times 2.6 = 0.052 \text{ Kg/s}$$

4.5.4. REGULATION DE LA TEMPERATURE D'ENTREE DU FLUIDE

Deux phases de régulation de la température d'entrée du fluide sont effectuées. Un régulateur de température primaire placé en amont du débitmètre et une seconde régulation placée immédiatement à l'entrée du capteur.

4.5.5. MESURE DE L'ANGLE D'INCIDENCE SOLAIRE

L'angle d'incidence est mesuré expérimentalement à l'aide d'un dispositif composé d'une aiguille placée à la perpendiculaire d'une plaque plane sur laquelle sont marqués des anneaux concentriques gradués. Les anneaux concentriques permettent de mesurer la longueur de l'ombre projetée par l'aiguille. Cet ombre est utilisé pour déterminer l'angle d'incidence. Le dispositif est placé dans le plan du capteur.

4.5.6. CONDITIONNEMENT PREALABLE AUX ESSAIS

Les préparatifs suivants ont été effectués avant les tests :

- Le capteur a été vérifié pour détecter un éventuel dommage ou anomalie ;
- La couverture du capteur a été nettoyée avec le plus grand soin ;
- Le capteur a été exposé dans des conditions de ciel clair, sans nuage afin de déterminer sa caractéristique de performance réelle ;
- Au moment de l'essai, l'éclairement solaire totale au niveau du plan d'ouverture du capteur a été maintenu à une valeur supérieure à $700 \pm 50 \text{ W/m}^2$;
- Le débit est stable autour de la valeur de consigne de 187 litre /h à 1 % près. Au cours du test il ne doit pas varier de plus des 10 % de la valeur de consigne lors du passage d'un essai à un autre.

4.5.7. ETALONNAGE EXPERIMENTALE DU BANC D'ESSAI

Avant d'entamer de mesure, il est nécessaire de procéder à l'étalonnage du système. En effet, l'étalonnage du banc d'essai a été réalisé à l'aide d'un dispositif existant et

renové au sein de l'Unité de Ghardaïa, tel que représenté en figure 4.14. Ce dispositif est constitué d'une boîte galvanisée, bien isolée, dont laquelle on introduit une résistance électrique. Cette dernière permet d'injecter une puissance utile connue égale à 1500 W pour chauffer le fluide caloporteur qui traverse le dispositif. Ce dernier joue le rôle d'un capteur solaire plan.



Figure 4.14 : Représentation du dispositif d'étalonnage du capteur

On fait circuler le fluide caloporteur au débit imposé par le test (0.02 Kg/s.m^2). Le fluide est chauffé grâce à l'intégration d'une résistance dans la boîte. Après stabilisation du système, les paramètres suivants sont prélevés :

- Température ambiante (T_a) ;
- Température d'entrée (T_e) ;
- Et la température de sortie (T_s).

A défaut de la thermopile qui permet de prélever un ΔT avec une grande précision, nous avons eu recours au calcul de $\Delta T = T_s - T_e$ (la différence de température de sortie et d'entrée). Les températures sont mesurées grâce aux thermocouples de type K ; placés dans des doigts de gant à l'entrée et sortie du fluide. La chaleur spécifique C_p du fluide caloporteur utilisé est estimée dans la gamme de température utilisée.

4.5.8. TESTS EXPERIMENTAUX POUR LE CALCUL DE LA CONSTANTE DE TEMPS

Le test de la constante de temps a été exécuté conformément aux recommandations européennes EN 12975-2 (Période d'échauffement). Les conditions de test étaient réunies, autant que le ciel était clair (rayonnement diffus < 20% du rayonnement globale), la température variait autour de 25° et le rayonnement global était supérieur à 800W/m². Au vu des conditions spécifiées par la norme, liées aux limites propres au banc d'essai, il faut signaler qu'il a été très difficile d'ajuster la température d'entrée à la température ambiante à $\pm 1^\circ\text{C}$, et de couvrir parfaitement le capteur.

On prélève lors des tests le temps, la température d'entrée, de sortie et la température ambiante. Le pyranomètre placé sur le plan du capteur permet la mesure de rayonnement global afin de vérifier les éventuelles variations des paramètres météorologiques et radiométrique conformément aux conditions de la norme.

4.5.9. TEST EXPERIMENTAUX DU RENDEMENT INSTANTANEE

Les tests pour la détermination du rendement instantané ont été effectués conformément aux recommandations européennes EN 12975-2.

La mise en marche du banc d'essai commence assez tôt. Chaque matin la température d'entrée doit être ajustée à une valeur fixée par la norme.

Les tests du rendement instantané ont commencés le 16 septembre 2010 autour de midi TSV.

Ils se sont effectués aux températures d'entrée suivantes :

- $T_i = 20^\circ\text{C}$
- $T_i = 30\text{C}$
- $T_i = 40^\circ\text{C}$
- $T_i = 50^\circ\text{C}$

Pour chaque température de travail, quatre points de mesures sont prélevés deux avant midi et deux après midi. Cela donne seize points de mesure au total.

Conformément à la norme utilisée, les conditions de tests suivantes ont été vérifiées:

- Eclairement solaire globale sur le plan incliné : $840 \text{ W/m}^2 < I_g < 950 \text{ W/m}^2$
- Eclairement diffus : $130 \text{ W/m}^2 < I_d < 220 \text{ W/m}^2$
- Température ambiante : $20^\circ\text{C} < T_a < 25^\circ\text{C}$
- Vitesse du vent : $1 \text{ m/s} < V < 3 \text{ m/s}$

La vitesse de vent a été mesurée à l'aide d'un anémomètre manuelle qui affiche les valeurs instantanées.

Le rendement instantané du capteur est estimé par rapport à la surface d'ouverture du capteur.

La température réduite T^*_1 est fonction de la température moyenne du fluide, de la température ambiante et du rayonnement globale tel que :

$$T^*_1 = U_0 \frac{T_{mf} - T_a}{I_g}$$

Où U_0 est le coefficient de transfert de référence pris égale à 10.

4.5.10. TEST EXPERIMENTAUX DE L'ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

L'angle d'incidence modifié est un facteur de correction qui permet la détermination du rendement du capteur pendant la journée.

Les tests se sont déroulés pendant la deuxième quinzaine d'octobre 2009, conformément aux normes EN 12975-2.

Le nombre de points relevés est de quatre points :

- Deux relevés, le matin et l'après midi à une incidence $40^\circ < \theta < 50^\circ$;
- Deux relevés au environ de midi TSV ($\theta < 15^\circ$) ;
- Deux points supplémentaires le matin et l'après midi ($40^\circ < \theta < 50^\circ$).

L'angle d'incidence a été fixé aux valeurs indiquées grâce à la variation de l'inclinaison du capteur.

- Pour le test de midi TSV, l'inclinaison β était fixé à latitude de lieu.
- Pour l'obtention des points le matin où l'après midi, l'inclinaison du capteur à été varié de 32° à 60° .

L'angle d'inclinaison du capteur (β) correspondant aux angles d'incidence désirés a été déterminé à l'aide de l'équation 3.1 du chapitre 3.

Les tests ont été effectués sur le site de Ghardaïa correspondant à une latitude $\Phi=32.38^\circ$.

- Point 1 : L'angle d'incidence $\theta = -55^\circ$
 1. Le test a été effectué le 25/10/2009 ($\delta = -11.8^\circ$) [61],
 2. Angle horaire $\omega = -52.25^\circ$.
 3. Le résultat trouvé pour cette incidence est $\beta = 60^\circ$.
- Point 2 : L'angle d'incidence $\theta = -50^\circ$
 1. Le test a été effectué le 19/10/2009 ($\delta = -9.7^\circ$) [61],
 2. Angle horaire $\omega = -60^\circ$.
 3. Le résultat trouvé pour cette incidence est une inclinaison de capteur $\beta = 60^\circ$.
- Point 3 : L'angle d'incidence $\theta = 0^\circ$
 1. Le test a été effectué le 29/10/2009 ($\delta = -13.2^\circ$) [61],
 2. Angle horaire $\omega = 0,17^\circ$.
 3. Le résultat trouvé pour cette incidence est β de 32.38° .

- Point 4 : L'angle d'incidence $\theta = 15^\circ$
 1. Le test a été effectué le 16/10/2009 ($\delta = -8.6^\circ$) [61],
 2. Un angle horaire ω de 9.56° .
 3. Le résultat trouvé pour cette incidence est une inclinaison $\beta = 32^\circ$.

- Point 5 : L'angle d'incidence $\theta = 55^\circ$
 1. Le test a été effectué le 25/10/2009 ($\delta = -11.8^\circ$) [61],
 2. Un angle horaire ω de 59.13° .
 3. Le résultat trouvé pour cette incidence est une inclinaison $\beta = 45^\circ$.

- Point 6 : L'angle d'incidence $\theta = 50^\circ$
 1. le test a été effectué le 27/10/2009 ($\delta = -12.5^\circ$) [61],
 2. Avec un angle horaire de 88.5° .
 3. Le résultat trouvé pour cette incidence est une inclinaison $\beta = 60^\circ$.

4.6. CONCLUSION

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les principales normes existantes pour les tests expérimentaux des capteurs solaires en régime quasi-stationnaire ainsi que leur différence pour le calcul du rendement instantané.

Nous avons aussi présenté le banc d'essai en boucle fermée, réalisé selon la norme 12975, avec tous les éléments qui le constitue et les instruments de mesure utilisés pour le test.

Nous avons développé dans ce chapitre les étapes préalables aux essais, l'étalonnage du banc d'essai ainsi que les procédures de calcul de la constante du temps, du rendement instantané et l'angle d'incidence modifié selon la norme EN 12975-2.

CHAPITRE : 5

RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. INTRODUCTION	72
5.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX	72
5.2.1. <i>Etalonnage du banc d'essai</i>	72
5.2.2. <i>Constante de temps.....</i>	73
5.2.3. <i>Rendement instantané</i>	75
5.2.4. <i>Angle d'incidence modifié</i>	76
5.3. DISCUSSION	79
5.3.1. <i>Constante de temps</i>	79
5.3.2. <i>Rendement instantané</i>	80
5.3.3. <i>Angle d'incidence modifié</i>	81
5.3.4. <i>Effet des normes sur le rendement instantané</i>	81
5.3.5. <i>Effet de la surface du capteur sur le rendement instantané.....</i>	84
5.3.6. <i>Variation du rendement en fonction de l'incidence du rayonnement</i>	86
5.3.7. <i>Comparaison des capteurs solaires plans.....</i>	87
5.3.8. <i>Calcul d'incertitude</i>	89
5.4. CONCLUSION	91

5.1. INTRODUCTION

Le banc d'essai a été monté en boucle fermée conformément à la norme EN 12975-2-2006 [22]. La période de mesures s'est étalée sur le mois de septembre 2009. Période approprié pour les tests solaires expérimentaux.

Les tests menés sur le capteur sont les suivants :

- Test de la constante de temps : Elle permet de déterminer la durée de test du rendement instantané.
- Test de la détermination de l'équation et de l'allure de la courbe du rendement instantané du capteur solaire plan.
- Test de l'angle d'incidence modifié qui permet de connaître le rendement instantané du capteur solaire plan à n'importe quelle incidence de la journée.

5.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.2.1. ETALONNAGE DU BANC D'ESSAI

Sachant que la surface du capteur est de 2.6 m^2 et que le débit imposé par la norme est $\dot{M} = 0.02 \text{ Kg/s m}^2$. Le débit utilisé lors des tests est de :

$$\dot{M} = 0.02 \times 2.6 = 0.052 \text{ kg/s}$$

Le fluide caloporteur utilisé est l'eau, et la plage de température de mesure varie entre 20°C à 70°C . La valeur moyenne de la chaleur spécifique C_p conforme à la gamme de température des tests est :

$$C_p (\text{eau}) = 4.183 \text{ kj /kg K à } 20^\circ\text{C} < T_a < 70^\circ\text{C}$$

Les données relevées sont :

- La température d'entrée est de $T_i = 25.37 \text{ }^\circ\text{C}$
- La température de sortie est de $T_s = 31.93 \text{ }^\circ\text{C}$

La puissance utile fournie par la résistance est $P_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e)$.

D'où :

$$P_u = 0.052 \times 4.183 \times 6.56 = 1.4269 \text{ kW} = 1426.9 \text{ W}$$

La puissance injectée par la résistance de chauffe étant de 1500 W.

L'erreur relative de la puissance est donné par :

$$\varepsilon_r = \frac{P_{uc} - P_{um}}{P_{uc}} \quad (5.1)$$

Après calcul. on obtient

$$\varepsilon_r = \frac{(1500 - 1426,9)}{1500} = 0.048 = 4.8\%$$

Le calcul de l'erreur enregistré pour cet étalonnage est donc 4.8 %, on peut alors considérer comme la réalisation du banc d'essai est convenable.

5.2.2. CONSTANTE DE TEMPS

On porte les points relatifs de ΔT en fonction du temps Δt . L'ajustement de ces points affiche une forme exponentielle de type :

$$\Delta T = A (1 - e^{-Kt}) \quad (5.2)$$

En tableau 5.1 sont données les relevés expérimentaux permettant le calcul de la constante de temps du capteur solaire plan.

Tableau 5.1 : Relevé de données expérimentales pour l'évaluation de la constante de temps

Δt (s)	T_e (°C)	T_a (°C)	T_s (°C)	I_g (W/m ²)
1	25.20	25.70	26.20	992
12	24.96	25.73	26.50	995
32	24.81	25.74	26.67	993
47	24.71	25.77	26.82	993
166	25.07	26.62	28.17	991
236	25.16	26.16	28.16	992
376	25.20	26.73	29.27	982
426	25.27	26.27	29.27	996
581	25.46	26.89	30.33	993
866	25.445	26.919	30.393	1076

Par ajustement des points à l'aide d'une simulation, l'équation de la courbe relative au calcul de la constante de temps est déterminée. Elle permet ainsi de définir également la valeur asymptotique A et la constante de temps $\frac{1}{k}$.

En figure 5.1 est représentée l'évolution de la constante de temps.

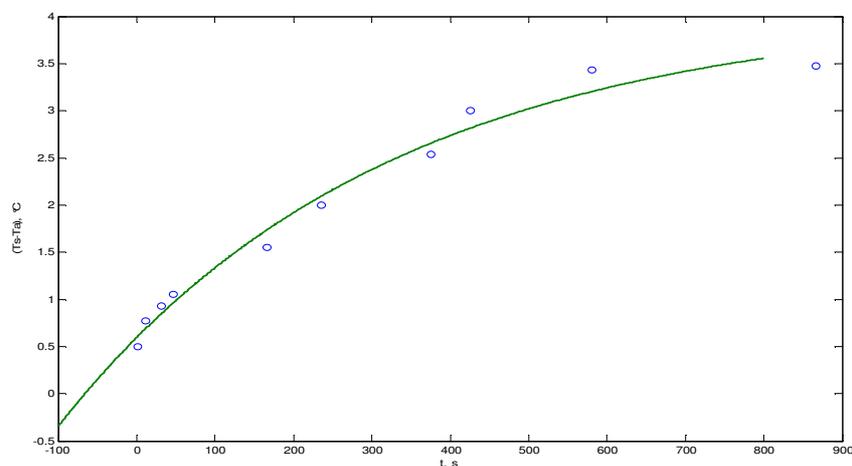


Figure 5.1 : Ajustement des points de mesure de la constante de temps.

Le dénominateur $\frac{1}{k}$ représente la constante de temps du capteur égale à 495 secondes. Elle représente le temps mis par la quantité ΔT (initiale) à atteindre les 0.632 de ΔT (finale).

La constante de temps est considérée a été prise à 10 minutes comme le stipule la norme EN 12973-2.

5.2.3. RENDEMENT INSTANTANNE

Sur le tableau 5.2 sont reportés les paramètres mesurés et calculés pour le tracé de la courbe de rendement :

Tableau 5.2 : Tests effectués pour le calcul du rendement instantané selon la norme EN 12975-2

Date	Heure	T _e	T _s	T _a	ΔT	I _g	I _d	T* ₁	η ₁
Jj/mm	He/mn	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(W/m ²)	(W/m ²)	(Km ² /W)	
16/09	11h29	21.45	25.04	18.61	3.584	815	216.3	0.056	0.36
16/09	11h44	21.14	27.18	22.25	6.032	941	156.9	0.02	0.53
16/09	12h54	20.46	25.72	20.28	5.268	950	137.5	0.029	0.46
16/09	13h09	20.82	26.31	20.01	5.493	954	154.5	0.037	0.48
17/09	11h09	31.86	36.58	23.20	4.714	839	185.3	0.131	0.46
17/09	11h24	31.72	36.39	23.79	4.674	850	194.4	0.12	0.45
17/09	13h44	32.16	36.69	22.34	4.539	935	217.5	0.129	0.40
27/09	13h59	31.67	35.77	24.62	4.102	897	207.5	0.101	0.38
22/09	11h41	39.08	43.38	23.24	4.302	940	171.4	0.191	0.38
22/09	11h56	39.75	43.92	22.59	4.174	951	167.4	0.202	0.36
22/09	13h14	40.22	43.82	20.26	3.602	915	170.8	0.237	0.32
22/09	13h29	40.67	44.46	21.72	3.79	889	163.2	0.234	0.35
29/09	12h01	49.15	52.82	22.42	3.665	878	207.2	0.325	0.34
29/09	12h16	49.32	52.65	21.50	3.337	906	208.3	0.325	0.30
29/09	13h11	49.89	52.52	22.01	2.624	918	210.1	0.318	0.23
29/09	13h26	49.15	51.65	21.68	2.501	918	219.7	0.312	0.22

Par lissage des points mesurés et calculés en utilisant la méthode des moindres carrés. on aboutit à la courbe caractéristique du rendement instantané du second ordre rapporté à la température moyenne du fluide.

La figure 5.2 montre l'évolution du rendement instantané du capteur.

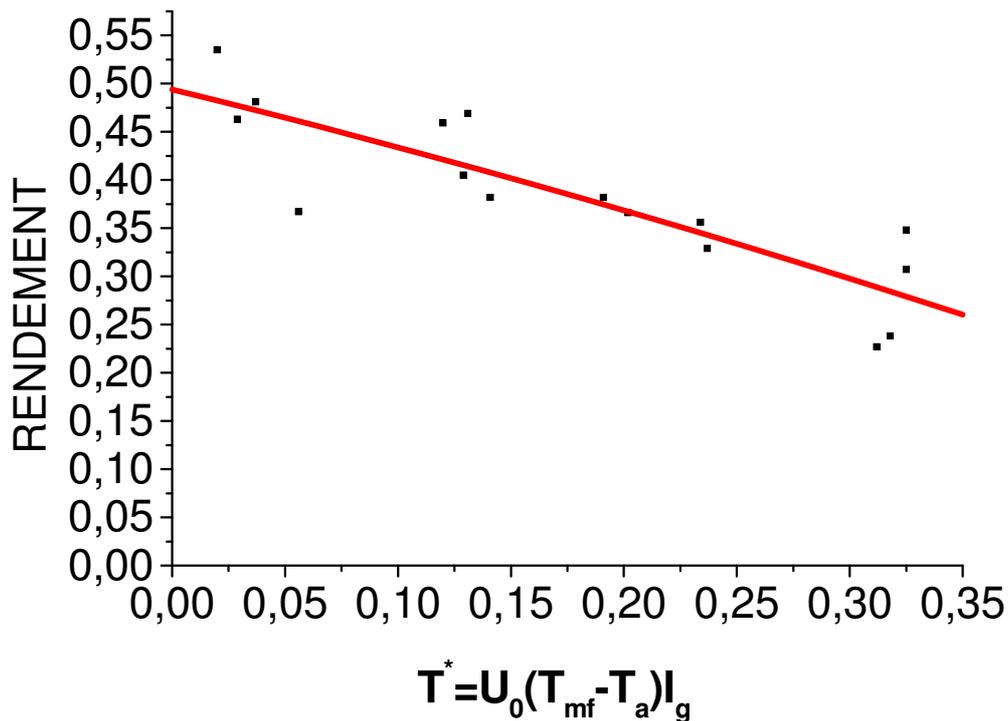


Figure 5.2 : Représentation du rendement instantané du capteur selon le standard EN 12973-2

Cette courbe satisfait à l'équation suivante :

$$\eta_1 = 0.49 - 5.7 T^* - 0.26 T^{*2} \quad (5.3)$$

Le résultat donne un bon coefficient de corrélation égale à 0.84.

- La valeur 0.49 : Représente le rendement optique du capteur $F'(\tau\alpha)_{\text{eff}}$. C'est l'intersection de la courbe avec l'axe des ordonnées.
- La valeur 5.7 : Représente les pertes thermiques globales du capteur ($F'U_g$). C'est la pente de la droite ; (W/m^2K).
- La valeur 0.26 : Représente la dépendance du coefficient de pertes thermique par rayonnement. Elle décrit la courbure de la courbe ; (W/m^2K^2).

Certaines normes ne rapportent pas ce coefficient car elles estiment que ces valeurs sont négligeables (les nouveaux capteurs possèdent des couches sélectives très modernes).

5.2.4. ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

L'angle d'incidence a été fixé aux valeurs indiquées grâce à la variation de l'inclinaison du capteur.

- Pour le test de midi TSV. le choix a été fait sur une inclinaison β égale à latitude de lieu.
- Pour l'obtention des points le matin où l'après midi, l'inclinaison du capteur à été varié entre 32° à 60° .

Etant donné qu'il était très difficile de fixer l'angle d'incidence et que le banc d'essai permet des inclinaisons figées. Nous avons incliné le capteur à un angle de 60° et déterminer l'angle horaire correspondant aux angles d'incidence entre 40° et 50° imposés par la norme.

Le tableau 5.3 relève les valeurs expérimentales pour la détermination de l'angle d'incidence modifié du capteur étudié.

Tableau 5.3 : Valeurs expérimentales relevées pour le calcul de K_{α}

Points	θ ($^\circ$)	$T^*(\text{Km}^2/\text{W})$	η	$[(1/\cos\theta)-1]$	K_{α}
01	-55	0.028	0.391	0.6689	0.836
02	-50	0.034	0.343	0.555	0.734
03	0	0.076	0.468	0	1
04	15	0.049	0.452	0.025	0.966
05	50	0.110	0.320	0.657	0.685
06	55	0.063	0.327	0.750	0.699

Les résultats de l'angle d'incidence modifié conformément à la norme EN 12973-2 donnés en fonction de :

- l'angle d'incidence θ .
- et $[1/\cos(\theta)-1]$.

L'ajustement des points de mesures de l'angle d'incidence modifié $K_{\tau\alpha}$ en fonction de l'angle d'incidence θ se présente sous forme parabolique, tel que représenté en figure 5.3.

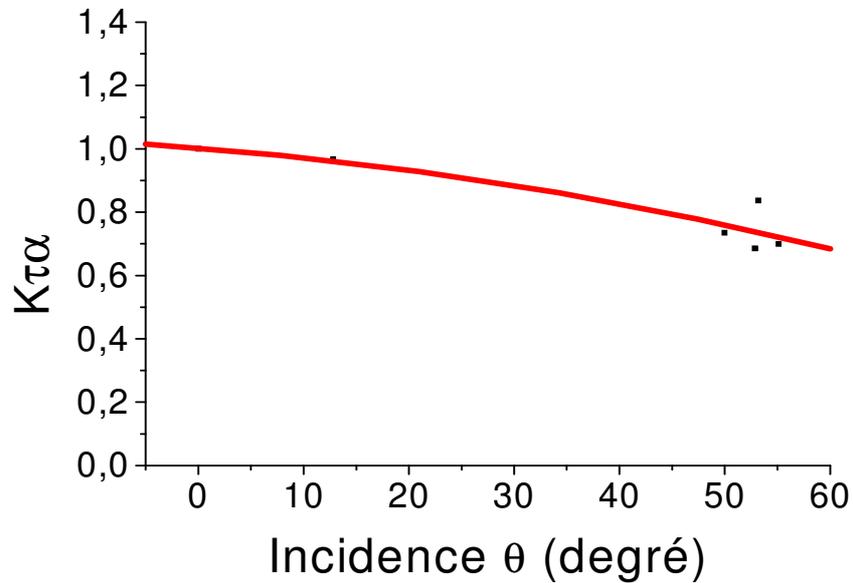


Figure 5.3 : Angle d'incidence modifié en fonction de l'angle d'incidence θ

L'équation caractéristique de l'angle d'incidence modifié en fonction de θ est :

$$K_{\tau\alpha} = 1 - 0.00261 \theta - 0.000448 \theta^2 \quad (5.4)$$

En figure 5.4, les résultats sont présentés en fonction du facteur $[(1/\cos(\theta))-1]$.

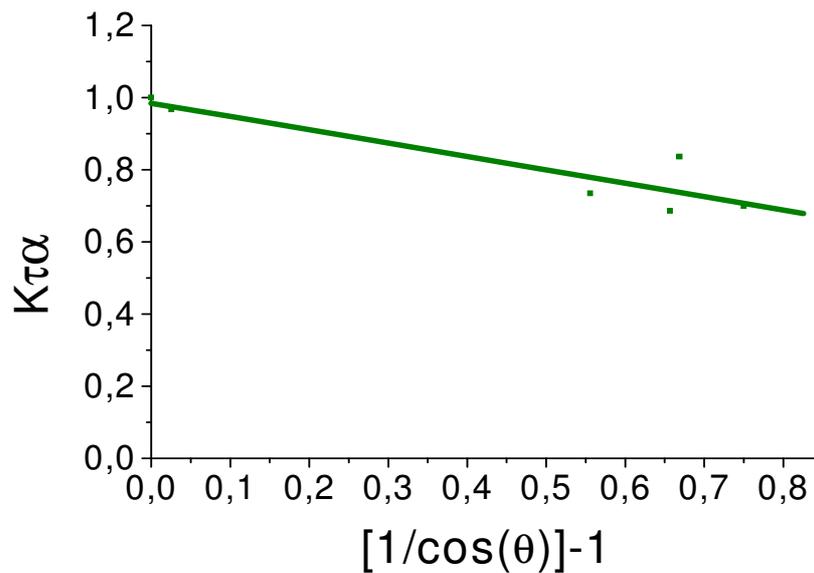


Figure 5.4 : Angle d'incidence modifié en fonction de $[(1/\cos\theta)-1]$ selon la norme EN 12975-2

L'équation caractéristiques de $K_{\tau\alpha}$ en fonction de $[(1/\cos\theta)-1]$ trouvé par simulation est une droite tel que :

$$K_{\tau\alpha} = 1 - 0,37 [(1/\cos(\theta)) - 1] \quad (5.5)$$

Le résultat donne coefficient de corrélation R près de 0.83.

5.3. DISCUSSION

5.3.1. CONSTANTE DE TEMPS

On remarque que l'état stationnaire est atteint pour un $\Delta T \approx 3.5^\circ\text{C}$ après un temps de 866 s.

Au premier lieu l'ajustement des points mesurés et calculés de la constante de temps a donné une constante de temps de 248 s, mais le coefficient de corrélation de cet ajustement est très faible, ce qui nous a obligé de décaler l'axe des abscisses de 78

secondes, afin d'avoir un meilleur ajustement des points de mesure de la constante de temps.

L'équation de la constante de temps est une courbe exponentielle d'équation suivante :

$$\Delta T = 3.48 \left(1 - e^{-\frac{t}{495}}\right) \quad (5.6)$$

Avec :

$$A = 3.48 \text{ et } \frac{1}{k} = 495 \text{ secondes}$$

La constante de temps trouvée par ajustement de point est de 495 s, ce résultat a été trouvé après le décalage de l'axe des abscisses de 78 secondes, ceci est dû essentiellement à la difficulté d'ajuster la température d'entrée à la température ambiante au début des test, et de couvrir complètement le capteur avec une surface opaque comme le stipule la norme. La valeur de 495 s est assez faible, ceci est dû probablement à l'état du capteur vieux de six ans.

5.3.2. RENDEMENT INSTANTANE

L'équation caractéristique du rendement instantané du second ordre, approche mieux au lissage des points. En effet, le coefficient de corrélation obtenu par lissage des points de l'ordre est de 0.85. Elle donne les principales caractéristiques du capteur tel que son rendement optique et le coefficient des pertes thermique globales.

D'après cette équation, on remarque que le rendement optique est de 49 %. Il représente le rendement maximum. Cette valeur reste faible par rapport au résultat trouvé par le laboratoire du CSTB de France en mars 2005 [60], elle approche les 69 % pour le même capteur. Cette différence est due essentiellement à l'état du capteur testé (capteur vieux de six ans) ; ce qui provoque des pertes de la qualité des propriétés optiques du vitrage. Par ailleurs, il ne faut pas négliger les erreurs éventuelles de mesures.

On remarque aussi que le coefficient de pertes thermiques globales du premier ordre est de $5.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Il est presque similaire à celui trouvé par le laboratoire de CSTB qui est de l'ordre de $5.44 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Cette petite différence est due aux erreurs de mesures mais il reflète aussi la qualité d'isolation avant et arrière (40 mm de laine de roche vers l'arrière et 20 mm de laine de verre latérale). Ceci indique que les propriétés des matériaux de l'absorbeur, de l'isolation ne sont pas détériorées avec le temps, ce qui est normale, puisque ces composants sont protégés des aléas externes.

Le coefficient de pertes du deuxième ordre est assez et grand égal à $0.26 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$. Ceci étant dû à la déformation que subit l'absorbeur à des hautes températures, ce qui provoque des pertes importantes par rayonnement (pertes des propriétés thermiques de la couche sélective à base de titane).

On remarque aussi que le rendement optique du capteur est important (supérieur à 40%) dans la gamme où le rayonnement global est important et l'écart de température entre la température moyenne du fluide et l'ambiant est faible ($T^* < 0.1$).

5.3.3. ANGLE D'INCIDENCE MODIFIE

Les résultats de l'évolution $K\tau\alpha$ en fonction de θ donnent une courbe de deuxième ordre en forme parabolique. Elle atteint un maximum pour une valeur égale à un (1). Les valeurs de $K\tau\alpha$ sont toutes inférieures à un (1), ce qui est vrai pour le capteur solaire plan, car ce dernier atteint un maximum de rendement pour une incidence normale.

On remarque surtout que $K\tau\alpha$ est plus ou moins constant dans la gamme d'angle d'incidence inférieur à 40° . Avec un verre solaire prismé, le rendement instantané du capteur solaire plan peut être constant jusqu'à un angle d'incidence de 60° .

On remarque aussi que le capteur solaire plan perd presque de 30 % de son rendement pour des angles d'incidence près de 60° .

L'évolution $K\tau\alpha$ en fonction de $[(1/\cos(\theta)) - 1]$ est une droite de pente 0.37. Sa valeur maximale est égale à un (1). Pour un capteur solaire plan vitré contrairement aux capteurs sous vides où il peut dépasser la valeur de 1. La valeur de la pente est 0.37 est assez faible, la raison est probablement due à la déformation du couvert, qui provoque les pertes des propriétés optiques de ce dernier. Étant donné que ce capteur possède un verre trompé et non prismé, son exposition à l'extérieur aux conditions naturelles contre le vent de sable pendant six ans a provoqué des pertes très importantes au niveau de la transmission du vitrage.

5.3.4. EFFET DES NORMES SUR LE RENDEMENT INSTANTANE

Dans le tableau 5.4 sont rapportées les valeurs du rendement instantané selon la norme ASHRAE.

Le calcul comme le stipule cette norme est rapportée à la surface globale du capteur et en fonction de la température d'entrée du fluide.

Tableau 5.4 : Résultats présentés selon la norme ASHRAE

Date	Heure	T_e	T_s	T_a	ΔT	I_g	I_d	T_2^*	η_2
Jj/mm	He/mn	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(W/m ²)	(W/m ²)	(Km ² /W)	
16/09	11h30	21.45	25.04	18.61	3.58	815	216.3	0.0034	0.32
16/09	11h45	21.14	27.18	22.25	6.03	941	156.9	-0.0011	0.47
16/09	12h55	20.46	25.72	20.28	5.26	950	137.5	0.0001	0.41
16/09	13h10	20.82	26.31	20.01	5.49	954	154.5	0.0008	0.42
17/09	11h10	31.86	36.58	23.20	4.71	839	185.3	0.010	0.41
17/09	11h25	31.72	36.39	23.79	4.67	850	194.4	0.009	0.40
17/09	13h45	32.16	36.69	22.34	4.53	935	217.5	0.010	0.35
27/09	13h59	31.67	35.77	24.62	4.10	897	207.5	0.007	0.33
22/09	11h41	39.08	43.38	23.24	4.30	940	171.4	0.016	0.33
22/09	11h56	39.75	43.92	22.59	4.17	951	167.4	0.018	0.32
22/09	13h14	40.22	43.82	20.26	3.60	915	170.8	0.021	0.29
22/09	13h29	40.67	44.46	21.72	3.79	889	163.2	0.021	0.31
29/09	12h01	49.15	52.82	22.42	3.66	878	207.2	0.030	0.30

29/09	12h16	49.32	52.65	21.50	3.33	906	208.3	0.030	0.27
29/09	13h11	49.89	52.52	22.01	2.62	918	210.1	0.030	0.21
29/09	13h26	49.15	51.65	21.68	2.50	918	219.7	0.029	0.20

Après lissage des points mesurés et calculés, on obtient la courbe de l'évolution du rendement instantané selon la norme ASHRAE est représentée en figure 5.5.

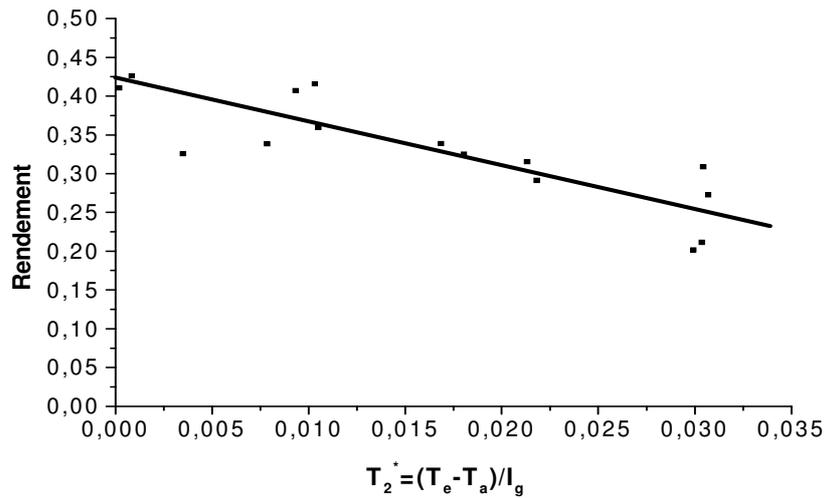


Figure 5.5 : Rendement instantané du capteur selon le standard ASHRAE

La figure 5.6 représente l'évolution du rendement instantané du capteur par linéarisation des mesures selon la norme EN 12975-2.

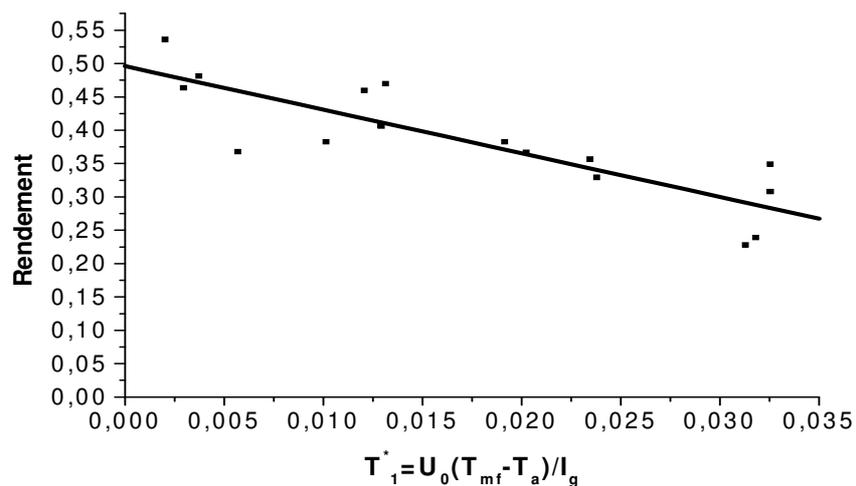


Figure 5.6 : Rendement instantané du capteur selon le standard EN 12973-2.

L'équation caractéristique du rendement instantané du capteur au premier ordre selon la norme ASHRAE est :

$$\eta_2 = 0.42 - 5.64 T_2^* \quad (5.7)$$

Le résultat donne un coefficient de corrélation de 0.73.

Le rendement optique de l'ordre 42 % et le coefficient de pertes thermiques globales est de 5.64 W/m² K.

L'équation caractéristique du rendement instantané du capteur au premier ordre selon la norme EN 12975-2 est :

$$\eta_1 = 0.49 - 6.53 T_2^* \quad (5.8)$$

Le résultat donne un rendement optique de l'ordre 49% et un coefficient de pertes globales est de 6.53 W/m² K

Le rendement instantané selon la norme ASHRAE est légèrement inférieur à celui calculé selon la norme EN 12975-2. La raison essentielle est le fait que la surface globale est supérieure à celle d'ouverture et la température réduite de chaque norme est différente.

Le coefficient des pertes globales du capteur selon la norme EN 12975-2 (au premier ordre) est égale à 6.53 W/m² K. est une valeur qui n'est pas loin à celle donnée par l'institut DEMOKRITOS (Grèce) [60], qui est de l'ordre de 4.44 W/m² K.

Par ailleurs, le rendement optique selon la norme EN 12975-2 est de 49 %. C'est une valeur très faible par rapport aux données des tests réalisés sur le même capteur à l'institut DEMOKRITOS qui est de l'ordre de 85%

5.3.5. EFFET DE LA SURFACE DU CAPTEUR SUR LE RENDEMENT

INSTANTANE

La figure 5.7 rapporte le calcul du rendement instantané rapporté respectivement à la surface globale, d'ouverture et de l'absorbeur du capteur.

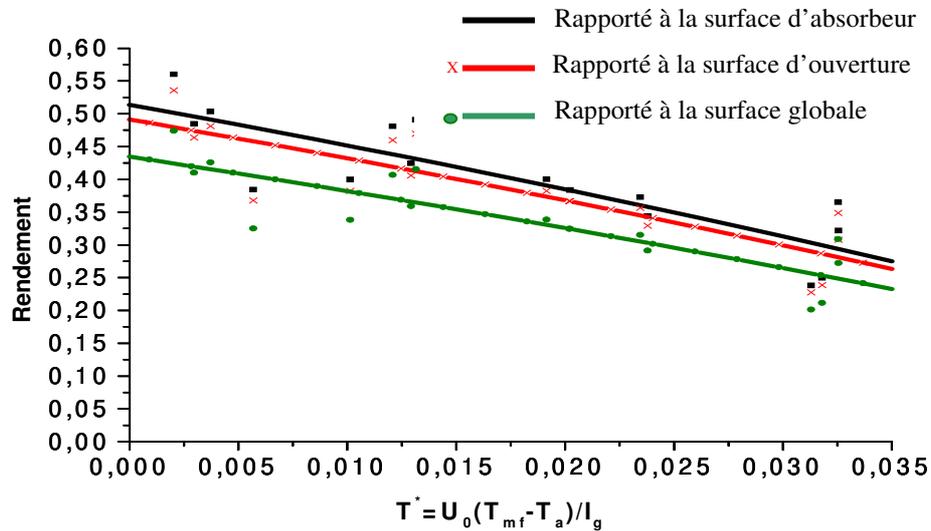


Figure 5.7 : Rendement instantané rapporté aux différentes surfaces du capteur

Les équations caractéristiques du rendement instantané au deuxième ordre sont respectivement :

Rendement instantané apporté à la surface globale du capteur :

$$\eta_1 = 0.43 - 5.02 T^* - 21.04 T^{*2} \quad (5.9)$$

Rendement instantané apporté à la surface d'ouverture du capteur :

$$\eta_2 = 0.49 - 5.68 T^* - 23.78 T^{*2} \quad (5.10)$$

Rendement instantané apporté à la surface de l'absorbeur du capteur :

$$\eta_3 = 0.51 - 5.94 T^* - 24.87 T^{*2} \quad (5.11)$$

On remarque que le rendement optique rapporté à la surface globale est égale 0.43 est inférieur à celui rapporté à la surface d'ouverture 0.49 qui est lui même inférieure à celui rapporté à la surface d'absorbeur. Ceci est du essentiellement à la différence de grandeur des surfaces. Ce qui fait la confusion chez quelques constructeurs des capteurs solaires plans en termes de rendement.

5.3.6. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE L'INCIDENCE SOLAIRE

Le rendement est maximum pour des incidences normales au capteur. Plus on s'éloigne de l'incidence normale, plus le rendement devient plus faible.

L'expression du rendement instantané du capteur est :

$$\eta_i = 0.49 - 5.7 T^* - 0.26 T^{*2} \quad (5.12)$$

Les tests ont été effectués autour de midi TSV (à une incidence normale). Il est nécessaire de voir l'évolution du rendement pendant la journée pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

Le rendement optique varie avec l'angle d'incidence tel que modélisé. Ceci nous entraîne à corriger ce facteur durant la journée.

L'expression du rendement instantané dans l'équation (5.3). ce dernier devient :

$$\eta_i = [1 - 0.37 [(1/\cos(\theta)) - 1] (0.49) - 5.7 T^* - 0.26 T^{*2} \quad (5.13)$$

Pour un moment de la journée où :

- $T_e = 21.45^\circ\text{C}$
- $T_a = 18.61^\circ\text{C}$
- $I_g = 815 \text{ W/m}^2$

La température réduite est $T^* = 0.056 \text{ }^\circ\text{C m}^2/\text{W}$

Le rendement serait alors fonction que de θ , tel que :

$$\eta_1(\theta) = [1 - 0.37 [(1/\cos(\theta) - 1) (0.49) - 5.7 (0.05) - 0.26 (0.05)^2] \quad (5.14)$$

L'évolution du rendement instantané du capteur pendant la journée est représentée en la figure 5.8.

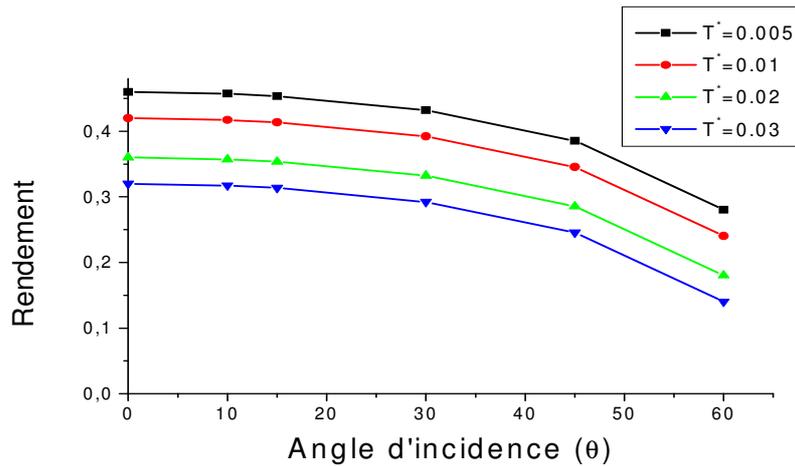


Figure 5.8 : Evolution du rendement instantané pendant la journée

On remarque une évolution similaire avec un décalage presque identique. Par ailleurs, le rendement tend à diminuer avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

5.3.7. COMPARAISON DES CAPTEURS SOLAIRES PLANS

La figure 5.9 rapporte la comparaison selon la norme européenne de trois types de capteurs solaires plans, un premier vitré avec un absorbeur sélectif à base de titane muni d'un verre trompé (le capteur étudié), un second capteur plan en plastique à couvert vitré (CPV) testé au centre de recherche national de Padova [45] et un troisième capteur vitré. plan à couche sélectif de type TN réalisé par l'Unité de Développement des Equipements Solaire et étudié par le Centre de Développement des Energies Renouvelables [47]. On présente l'évolution du rendement instantané pour les trois types de capteurs solaires plans.

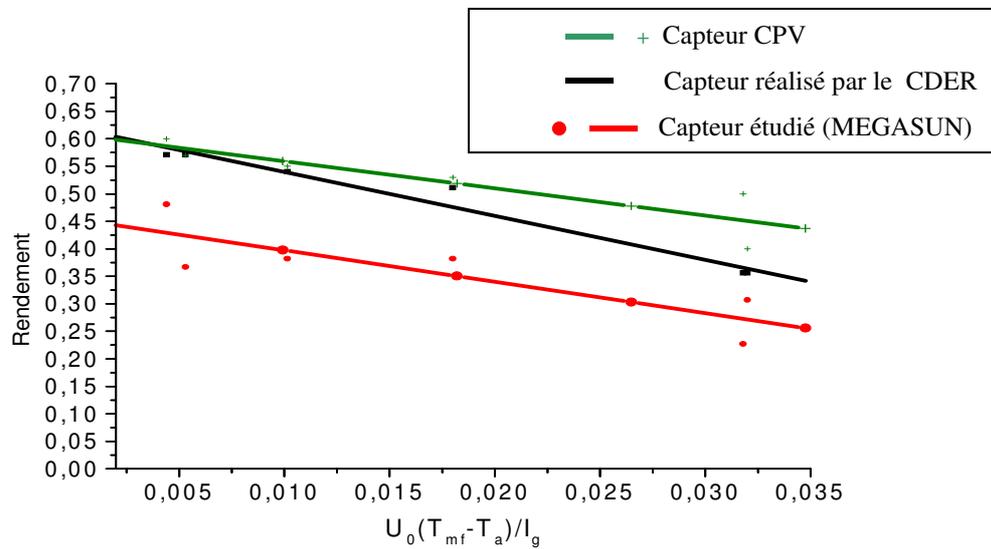


Figure 5.9 : Comparaison des trois types de capteurs solaires

Les rendements optiques et les pertes thermiques des différents capteurs solaires comparées sont donnés à travers les équations caractéristiques du rendement instantané, tel que :

- Le capteur étudié (MEGASUN)

$$\eta = 0.45 - 5.75 T^* \quad (5.15)$$

- Pour le capteur CPV :

$$\eta = 0.61 - 7.97 T^* \quad (5.16)$$

- Pour le capteur du UDES/CDER

$$\eta = 0.60 - 4.95 T^* \quad (5.17)$$

On remarque que les rendements optiques du capteur CPV et CDER/UDES sont égaux et supérieurs à celui du capteur étudié, ceci est dû essentiellement à la qualité des propriétés optiques du vitrage (le capteur étudié était exposé à l'extérieur pendant six ans aux conditions naturelles contre le vent de sable).

Concernant les pertes thermiques vers l'extérieur, le capteur CPV possède le coefficient de pertes le plus élevé, ceci est dû principalement à la qualité d'isolation. En effet, l'épaisseur arrière de ce capteur est de 25mm alors qu'elle atteint respectivement les 30mm et 40mm pour le capteur étudié et le capteur CDER/UDES.

De même, il est à noter que 5mm d'épaisseur latérale pour le capteur CPV contre 20mm et 35mm respectivement pour le capteur étudié et celui de l'UDES. Ceci entraîne dans tous les cas des pertes thermiques plus importantes pour le capteur CPV.

5.3.8. CALCUL D'INCERTITUDE

Vu la faible variation de la chaleur spécifique du fluide caloporteur (C_p) sur l'intervalle et niveaux de températures considérés. Elle est estimée à la température moyenne du fluide. En négligeant les erreurs commises sur la mesure de la surface du capteur et l'estimation de la chaleur massique. L'incertitude relative sur le rendement instantané et l'abscisse correspondante sont calculées [47].

Le rendement instantané d'un capteur solaire est donné par :

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_c)}{A I_g} \quad (5.18)$$

Selon la norme EN 12975-2 :

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \left[\left(\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_p}{C_p} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_g}{I_g} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.19)$$

Pour l'abscisse T^* température réduite, on a :

$$\frac{\Delta T^*}{T^*} = \left[\left(\frac{\Delta \dot{T}_s}{2(T_{mf} - T_a)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_e}{2(T_{mf} - T_a)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_a}{2(T_{mf} - T_a)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_g}{I_g} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.20)$$

En cumulant les incertitudes absolues dues aux sondes et l'enregistreur, les erreurs absolus selon la norme EN 12975 sont :

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = 0.01$$

$$\Delta(\Delta T) = 0.1^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta I_g}{I_g} = 0.06$$

$$\Delta T_a = 0.2^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_e = 0.5^\circ\text{C}$$

Après calcul, on obtient selon la norme EN 12975-2, les gammes de variations des erreurs sur η et T^* , tel que :

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = [6.92\% - 9.75\%]$$

$$\frac{\Delta T^*}{T^*} = [6.08\% - 11.85\%]$$

Si la connaissance des performances thermiques d'un capteur solaire est indispensable pour tout travail de recherche ou de dimensionnement, il est également nécessaire de déterminer les incertitudes commises pendant les tests expérimentaux selon la norme utilisée. Ceci reflète l'exigence de chaque standard par rapport à l'autre.

5.4. CONCLUSION

Dans le présent chapitre nous avons présenté les principaux résultats sur le calcul du rendement instantané du capteur selon la norme EN 12975-2. On a surtout présenté l'importance du calcul de l'angle d'incidence modifié sur les performances journalière du capteur. Elle a été suivit par une étude d'estimation des incertitudes qui peuvent être commises lors des tests réalisés selon la norme utilisée.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail résume l'essentiel des différents travaux scientifiques accomplis dans le domaine des capteurs solaires plans dans le monde, au Maghreb ainsi qu'en Algérie. L'état de l'art sur l'étude des performances thermiques des capteurs ainsi que les tests réalisés selon les différentes normes a permis l'introduction notre problématique qui est l'effet de l'angle d'incidence modifié sur les performances thermiques des capteurs solaires.

Une modélisation théorique du capteur solaire plan a été développée, ce qui a permis de déterminer l'expression générale du coefficient des pertes thermiques globales, de la quantité de chaleur effective transmise par la vitre et absorbé par l'absorbeur ainsi que l'expression du rendement instantané pour une incidence normale selon la norme EN 12975-2.

Par ailleurs, elle a été suivie par une étude théorique sur la modélisation de l'angle d'incidence modifié, objet de ce travail, qui a permis de déterminer l'importance du facteur de correction du rendement instantané du capteur le long de la journée, ainsi que la forte influence de l'inclinaison du capteur sur l'angle d'incidence.

Un banc d'essai en boucle fermée a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa selon la norme EN 12975-2. Tous les éléments qui le constitue et les instruments de mesure utilisés pour le test ont été présentés.

Une étude des différentes normes les plus utilisées a été présentée, afin de montrer la différence qui existe entre ces normes en terme de précision et de facilité des tests.

Les résultats montrant la différence pour le calcul du rendement instantané du capteur selon deux normes différentes EN 12975-2 et ASHRAE ont été montrée et

discutés par comparaison avec d'autres résultats trouvés dans la littérature et pour différents cas.

L'importance de l'angle d'incidence modifié sur les performances journalières du capteur a été démontrée à travers la détermination des performances en fonction de l'angle d'incidence θ . L'estimation sur le calcul des incertitudes qui peuvent être commises lors des tests réalisés selon la norme utilisée a été calculée.

Par ailleurs, il est intéressant de lancer un banc d'essai en boucle ouverte pour une possibilité de caractériser des capteurs solaires en régimes dynamiques ; même pour d'autres types de capteurs solaires (des capteurs sans vitrage et des capteurs sous vides).

Enfin, il sera souhaitable qu'au niveau national ; d'introduire des normes afin de caractériser tout types de capteurs solaires importés ou produits au niveau national dans des conditions climatiques propre à l'Algérie.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Hottel. H. C et B.B.Woertz « The performance of flat solar heat collector ». Am. Soc Mech Eng 64, pp 91-104 ; (1942).
- [2] Bliss. R.W « The derivation of several plate solar collector performance ».Proc, conf. On the use of solar energy , 3(4), pp 55-64 ; (1959).
- [3] Klein. S. A, J. A. Duffie et W. A. Beckman « Trans Consideration of flate-plate solar collector ». Transit ASME, Journal of Energy for power , 96A ; (1974).
- [4] Abdelkhalik. S. I « Heat removal factor for flat-plate solar collector with serpentin tube ». Solar Energy, vol 18, N°1, pp 59 – 64 ; (1976).
- [5] Smith C. « Design Application of the Hottel-Whillier – Bliss equation ». Solar Energy , vol 18, pp183-191 ; (1977).
- [6] Warren. F « The effects of axial conduction on collector heat removal factor ». Solar Energy ,vol 23, pp 187-191 ; (1979).
- [7] Lunde. P. J. « New Heat Transfer factor for flate plate solar collector ». Solar Energy, vol 27, N° 2, pp 109-113 ; (1981).
- [8] Zugari. M. R. et J. J. Villierme « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire , l'utilisation d'une structure à lamelles ». Entropie N° : 176-25-30 ; (1993)
- [9] Avezov. R. R, N. A. Kakharov et K. B. Khoddzhiev « Lowering the temperature in components of demontable Sheet-and pipe Heat absorbers of solar collector used for heating Water ». Solar Energy, vol 30, N° 4, pp 36-43 ; (1994).
- [10] Abid. N et A.Tayeb « Méthodes de test des systèmes de chauffe eau solaires ; Etude comparative ». Revue des Energies Renouvelables, pp 11 – 17 , CICME'08 Sousse ; (2008).
- [11] Hellel. M « Contribution à l'étude des performances thermiques des capteurs solaires plans sans vitrages en toiture », Thèse Magister ; (1989).
- [12] Rahni. N. « Estimation des Performances à Long terme d'un chauffe eau solaire à thermosiphon par la méthode de F- Chart ». Mémoire de fin d'étude d'ingénieur ; (1990).
- [13] Hamid A. « Etude et réalisation d'une installation solaire de chauffage d'eau collectif » , Revue Energies Renouvelables , pp 95-100, Zones arides ; (2002).

- [14] Semmar D. « Etude et réalisation d'un capteur solaire à air ». Revue Energies Renouvelables, pp 33-38, physique énergétique ; (1998).
- [15] Abdi H. « Contribution à la détermination des performances de capteur plans solaire à contact direct eau-plaque absorbante ». Mémoire de Magister ,Université Blida ; (1999).
- [16] Lafri D. « Etude d'un comportement thermique d'une cuve de stockage solaire à échangeur de chaleur ». Revue Energies Renouvelables, pp127-132, journée du thermique ; (2001).
- [17] Bouhired F. « Expérimentation du système de régulation et contrôle destiné pour l'appoint électrique d'un chauffe-eau solaire ». Revue Energies Renouvelables, pp 87-90, Valorisation ; (1999).
- [18] Hakem S. « Etude théorique et expérimentale du stockage thermique par des méthodes stochastiques ».Thèse de magister, USTHB ; (2010).
- [19] Standard technical note 899. «Development of proposed standard for testing solar collectors and thermal storage » ; (1976).
- [20] ASHRAE 93-77 : The American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, INC. « Methods of testing to determine the thermal performance solar collectors ». New York 10017 USA ; (1977).
- [21] SRCC-standard OG-100 2005 « Solar Rating and Certification Corporation, collector certification ». Test Methods and Minimum Standards for Certifying Solar Collectors, Florida ; (2005).
- [22] Norme Européenne EN 12975-2 : « Installations solaires thermiques et leurs composants partie 2 : Méthode d'essai », AFNOR, France ; (2006).
- [23] Standards Australiennes 2535-198 « Solar collectors with liquid as the heat-transfer fluid-method for testing thermal performance», Standards association of Australia ; (1982).
- [24] ISO standard 9806-1 test methods for solar collector, partie 1 « Thermal performance of liquid heating collectors » , Switzerland ; (1980).
- [25] CSA-F378-87. The Canadian Standards Association « Solar Collectors for Solar collector as components for use in domestic Water Heating ». Canada ; (2004).
- [26] Hayward « Construction of a solar collector test facility ; Development and Validation of Flat-Plate Collector Testing Procedures » – Report 4, Solar Energy Laboratory ; (2007).
- [27] Beghi G. « Thermal energy storage », Solar energy, vol 33, issue 5, pp 433 ; (1984).

- [28] Proctor D. « A generalized method for testing all class of solar collectors. 1-Attainable accuracy. 2- Evaluating of collector thermal constants. 3-Linearized efficiency equations ». Solar Energy, vol 32, N°3 ; (1984).
- [29] Bourges B. « Accuracy of european all day test partie 2 : Prediction long term performance ». Solar energy, vol 47, pp 17-25 ; (1991).
- [30] Morrisson L. G. « Heat Transfer in Evacuated Tubular Solar Collectors ». Solar Energy, vol 178, Issue 2, pp 257-267, ISES Solar World Congress ; (2003).
- [31] Kaushrika N. D. « Transmittance-absorptance product of solar glazing with transparent insulation materials », Solar Energy and Materials and solar cells, vol 44, Issue 4, pp. 383-395, December ; (1996).
- [32] Amer E. H. « Comparaison of dynamic test methods ». Energy Conversion and Management, vol 39, Issues 3-4, pp 285-293 ; (1997).
- [33] Sabatelli V. « Uncertainty analysis of ISO 9806-1 ».Energy Conversion and Management, vol 43, Issue 17 , pp 2287-2295 ; (2002).
- [34] Dintchev O. Mpaesele-Motsum Inchev « Performance tests in standards compliance for solar water heating projects » . Afrique du sud ; (2003).
- [35] Maxwell Yu. Li. « Uncertainty evaluation of a solar collector testing system in accordance with ISO 9806-1 ». Solar Energy vol 30 , pp 2447–2452 ; (2005).
- [36] Fisher S. H. et M. Steinhargen « Collector test method under quasi-dynamic, conditions according to the European Standard EN 12975-2 ». Proc. ISES, Solar World Congress, Adelaide, Australia ; (2001)
- [37] Hou H. J. « A new method for the measurement of solar collector time constant ». Renewable Energy, vol 30, issue 6, pp 855-865 ; (2005).
- [38] M. Kratzenberg, H. G. Beyer et S.Colle « Setup of a test facility for the characterization of thermal collectors according to the Euronorm at the Universidade Federal de Santa Catarina ». Proceedings : Sun at the end of the world, Internacional solar enery congress, Valparaiso, Chile ; (2002).
- [39] Facao J. «Experimental uncertainty analysis in solar collector ». International journal of ambient energy,vol 27, number 2 ; (2006).
- [40] Boudihardjo G. et L. Morison « Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters ». Solar Energy 83 , pp 49–56 ; (2009).
- [41] Rojas D. et A. Klein « Thermal performance testing of flat-plate collectors ». Solar Energy 82 , pp:746–757 ; (2008).

- [42] Norme marocaine NM « Méthodes d'essais des capteurs solaires à circulation de liquide ». Rapport du projet ; (2001).
- [43] Guedira A. « Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement Naturel au Maroc ». Revue des énergies renouvelables, pp 79-84, Journées de Thermique ; (2001).
- [44] Bouden C. et S. Boufares « Automatisation de la mesure sur banc d'essai pour les chauffe-eau solaires ». Revue énergies renouvelables, journées du thermiques, pp 47-52 ; (2001).
- [45] Kasbadji N. « Etude théorique et expérimentale des performances instantanées de trois capteurs solaires plan à eau ». Thèse de Magister, HCR ; (1986).
- [46] Merzouk M. « Etude théorique et expérimentale des performances instantanées d'un capteurs solaires sous vide ». Thèse de Magister, HCR ; (1986).
- [47] Kasbadji N. « Rapport d'activités scientifiques 1986 -1990 ». CDER ; (1990).
- [48] Boulghras M. K. « Etude comparative des performances d'un capteur solaire sous vide et d'un capteur solaire ordinaire ». Thèse de magister, université de Constantine ; (1998).
- [49] Yettou F. « Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des hauts plateaux ». Revue des Energies Renouvelables, vol. 11 N°1, pp119 – 128 » ; Mars (2008).
- [50] Chauard P. Michel H. et M. F. Simon « Bilan thermique d'une maison solaire ». Edition Eyrolles ; (1979).
- [51] « Différents types de capteurs solaires » .www.raee.org/solaire/1ASDER-capteurs-marche.pdf
- [52] Kaci K. « Etude et réalisation d'un nouveau prototype de capteur solaire plan à contact direct eau-plaque absorbante , configuration convexe ». Memoire PFE, Université de Blida ; (1997).
- [53] Chassériaux J. M. « Conversion thermique du rayonnement solaire ». Edition Dunot , France ; (1984)..
- [54] Jannot Y. D. « Thermique solaire ». Université de Bordeaux , Octobre ; (2003).
- [55] Duffie J. A. et W. A. Beckman « Solar Engineering of Thermal Processus » Université of Wisconsin Madison, Solar Energy Laboratory, USA ; (1991).
- [56] Feradj M. F et D. Nibou « Etude du système d'appoint pour installation chauffage d'eau solaire collectives ». PFE, université de Blida ; (2000).

- [57] Sfeir A. et G. Garracino « Engineering des systèmes solaires, application à l'habitat ». Paris ; (1981).
- [58] Pilissou A ,T. Cabirol et D. Roux « L'isolateur plan a effet de serre et le chauffe-eau solaire ». Fonctionnement, réalisation et le coût, La calade : Edisud ; (1980).
- [59] Benkaciali S. « Etude expérimentale du coefficient de trouble atmosphérique sur le site de Ghardaïa ». Revue Energies Renouvelables, vol 12, N°4 ; (2009).
- [60] Avis technique 14/05-947, CSTB, « Capteur solaire ST 2000 et ST 2500 » ; France (2006).
- [61] Yaiche. R et Bekkouche S. M. « Conception et validation d'un programme sous excel pour l'estimation du rayonnement solaire direct en Algerie. Cas d'un ciel clair ». Revue International d'Helio technique Energie-Environnement N° 39, pp 50-55 ; (2009)

ANNEXES

ANNEXE

RAPPORT D'ESSAI DE PERFORMANCES DES CAPTEURS SOLAIRES VITRES **DANS LES CONDITIONS D'ETAT STATIONNAIRE EN-12975-2-2006**

1. Généralités

N° de référence du capteur :

Essai effectué par :

Adresse :

Date, tél., fax :

2. Description d'un capteur solaire

Nom du fabricant :

Nom commercial

Numéro de série :

Type de capteur : sans vitrage/vitré/sous vide

Plan n° :

Année de fabrication :

Plage de débit

en kg/s

Pression de service

KPa

Température de stagnation à 1 000 W/m²

°C

et une température ambiante de 30 °C

Dispositif du capteur :

Capteur :

Désignation :

Plan/sous vide/sous-atmosphérique :

Superficie hors-tout :

Superficie d'entrée :

Aire de l'absorbeur :

Dimensions du capteur :

Longueur : mm

Aire de l'absorbeur : m²

Largeur : mm

Superficie d'entrée : m²

Hauteur : mm

Superficie hors-tout : m²

Poids, à vide :

Teneur en fluide :

Nombre de couvertures :

Matériaux constitutifs de la couverture :

Épaisseur de la couverture :

Transmittance solaire de la couverture :

Absorbeur :

Matériau :

Largeur des ailettes :

Épaisseur des ailettes :

Absorbance solaire α :

Émissivité hémisphérique ε :

Traitement de surface :

Type de construction :

Nombre de tubes :

Diamètre ou dimensions de tube :

Distance entre les tubes :

Dimensions :

Isolation thermique et revêtement :

Épaisseur de l'isolation thermique :

Matériau isolant :

Matériau de revêtement :

Matériau d'étanchéité :

Restrictions :

Température de service maximale :

Pression de service maximale :

Autres restrictions :

Photographie du capteur

Commentaires relatifs à la conception du capteur

Diagramme schématique du montage du capteur

Diagramme schématique de la boucle d'essai

Fluide caloporteur : eau/huile/autre

Spécifications (adjuvants,...) :

Autres fluides caloporteurs acceptables :

Résultats d'essai

À l'extérieur

À l'intérieur

À l'extérieur

Méthode d'état stationnaire

Méthode d'état stationnaire

Méthode quasi-dynamique

À l'extérieur

À l'intérieur

Latitude :

Rayonnement solaire moyenne :

Longitude :

Type des lampes utilisées :

Azimut du capteur :

protection contre le rayonnement de grandes longueurs d'onde

Oui

Non

Inclinaison du capteur :

Orientation des tubes de l'absorbeur durant l'essai (horizontale ou verticale) :

Puissance maximale ($I_g = 1\ 000\ \text{W/m}^2$) par capteur : W_{peak}

Puissance fournie par le capteur (W) :

Rayonnement solaire			
$T_m - T_a$ (K)	400 W/m^2	700 W/m^2	1 000 W/m^2
10			
30			
50			

Note : Les valeurs consignées sont valables pour une incidence normale.

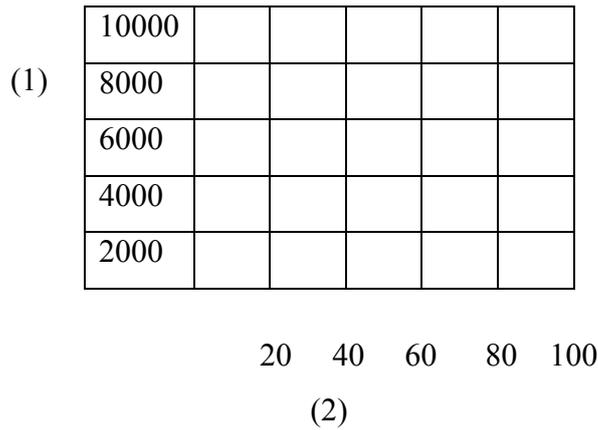


Figure 1 — Puissance fournie par capteur (pour $G = 1\,000\text{ W/m}^2$)

Légende

(1) Puissance fournie par capteur [W]

(2) $(T_m - T_a)$ [K]

Courbe de rendement instantané fondée sur l'aire de l'absorbeur/la superficie/d'entrée et la température moyenne du fluide caloporteur.

De référence : Aire de l'absorbeur A_A Superficie de référence : Superficie d'entrée A_a

Aire de l'absorbeur utilisée:
pour la courbe en m^2

Superficie d'entrée utilisée
pour la courbe en m^2

Le rendement instantané est défini par :

$$|\eta = \frac{\dot{Q}}{A_A I_g} \tag{D.1}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{A_a I_g} \tag{D.2}$$

Débit de fluide utilisé pour les essais : kg s^{-1}

Superficie hors-tout du capteur : m^2

Lissage de second ordre aux données :

$$\eta_A = \eta_{0A} - a_{1A} \left(\frac{T_{mf} - T_a}{I_g} \right) - a_{2A} I_g \left(\frac{T_{mf} - T_a}{I_g} \right)^2 \tag{D.3}$$

$$\eta_a = \eta_{0a} - a_{1a} \left(\frac{T_{mf} - T_a}{I_g} \right) - a_{2a} I_g \left(\frac{T_{mf} - T_a}{I_g} \right)^2 \quad (D.4)$$

À partir de la superficie de l'absorbeur		Ecart type	À partir de la superficie d'entrée		Ecart type
η_{0A}			η_{0a}		
a_{1A}			a_{1a}		
a_{2A}			a_{2a}		

Constante de temps

$$\tau_c = \quad \text{s}$$

Capacité thermique effective

$$C_p = \text{JK}^{-1}$$

Détermination :

Calcul :

à l'intérieur :

à l'extérieur :

Facteur d'angle d'incidence

Angle :

$$K_{\tau\alpha} :$$

Défaillances constatées

Donner les détails concernant toute défaillance définie comme «majeure» de l'EN 12975-1: 2006.

L'essai a pour objet d'évaluer rapidement si un capteur peut résister à des niveaux de rayonnements solaires élevés sans faire l'objet d'une défaillance telle que bris de verre, affaissement de la couverture en plastique, fusion de l'absorbeur plastique ou dépôts importants sur la couverture du capteur dus à une émission de gaz du matériau constitutif du capteur.

Échantillon fourni le :

Début des essais :

Fin des essais :

Laboratoire d'essai : Date :.....