



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN - TIARET-

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

ANNEXE SOUGUEUR

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par : BENELMOUAZ Mohamed Amine

THÈME

Etude numérique du comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire plan à eau en vue d'améliorer ses performances

Soutenue publiquement le :24 / 06 / 2018

devant le Jury composé de:

Mr A. KARAS	M. C .A	Université de Tiaret	Président
Mr B. TRARI	M. A .A	Université de Tiaret	Examineur
Mr A. DJELLOULI	M. A .A	Université de Tiaret	Examineur
Mr A. SAFA	M. A .B	Université de Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2017 /2018

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À la mémoire de ma grande mère

À mon grand-père

À mes chers parents

À mes oncles et tantes

À mes chers frère et sœurs

À ma très cher amie Sara

*À toute la famille **BENELMOUAZ***

*À plus mon encadreur que je respecte **A. SAFA***

À mes amis Hamid, Mohamed

À tous ceux qui me sont chers

À tous les membres de ma promotion énergétique et énergies renouvelables.

Mohamed Amine Benelmouaz

Remerciement

Tous d'abord, nous remercions le dieu **Allah**, notre créateur de nos avoir donné tout la puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Monsieur **SAFA ABDELKADER** qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, tout particulièrement :

Monsieur **KARAS**, Maître de conférences "A" à l'université de Tiaret, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à Monsieur **TRARI**, Maître d'assistante "A" à l'université de Tiaret et à Monsieur **DJELLOULI**, Maître d'assistante "A" à l'université de Tiaret, pour avoir faire de lecteur notre mémoire, aller l'examiner et ils peuvent évaluer cette mémoire. Nous vous remercions pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour vos précieux conseils et remarque.

Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire.

SOMMAIRE

DEDICACE

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

NOMENCLATURES

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CAPTEURS SOLAIRES

1-1 INTRODUCTION2

1-2 DEFINITION D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN2

1-3 CONSTITUANTS D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN3

1-3.1 Couverture transparente (vitrage) 4

1-3.2 Absorbeur 4

1-3.3 Fluide caloporteur 4

1-3.4 Isolation thermique 7

1-3.5 Coffre 8

1-4 FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN8

1-5 TYPES DES CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES9

1-5.1 Les capteurs solaires plans non vitrés..... 9

1-5.2 Les capteurs solaires plans vitrés..... 10

1-5.3	Les capteurs sous vide	12
1-5.4	Capteur CPC (Compound Parabolic Concentration).....	13
1-6	LES DIFFERENTS PARAMETRES INFLUANT SUR LE RENDEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE	14
1-6.1	Les paramètres externes.....	14
1-6.2	Les paramètres internes	15
1-7	PERTES THERMIQUES DANS UN CAPTEUR SOLAIRE.....	17
1-7.1	Pertes par convection.....	17
1-7.2	Pertes par conduction.....	17
1-7.3	Pertes par rayonnement.....	17
1-8	PERTES DE CHARGE	18
1-9	LE CORPS NOIR	18
1-10	EFFET DE SERRE.....	18
1-11	DOMAINE D'APPLICATIONS DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN	19
1-12	CONCLUSION.....	19
CHAPITRE 2 : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES CAPTEURS SOLAIRES		
2-1	INTRODUCTION	20
2-2	PRESENTATION DE QUELQUES TRAVAUX CONCERNANT LES CAPTEURS SOLAIRES	20
2-3	CONCLUSION.....	37

CHAPITRE 3 : MODELISATION THERMIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

3-1	INTRODUCTION	38
3-2	GRANDEURS GEOGRAPHIQUES ET ASTRONOMIQUES POUR LE GISEMENT SOLAIRE	39
3-2.1	Grandeurs pour le repérage du soleil	39
3-2.1.1	Repère de coordonnées équatoriales.....	39
3-2.1.2	Repère de coordonnées horizontales.....	40
3-2.2	Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre	41
3-3	ESTIMATION PRATIQUE DES FLUX DIRECT, DIFFUS ET GLOBAL	42
3-3.1	Rayonnement solaire	42
3-3.2	Constante solaire.....	42
3-3.3	Rayonnement direct	43
3-3.4	Rayonnement diffus.....	44
3-3.5	Rayonnement global	44
3-4	METHODE DE DESCRITISATION	46
3-4.1	Differences finies.....	46
3-4.2	Elements finis	46
3-4.3	Volumes finis.....	46
3-4.4	Methodes spectrales.....	47
3-5	METHODE NODALE.....	47
3-6	HYPOTHESES SYMPLIFICATIVES	49

3-7	MODELISATION DE LA TEMPERATURE AMBIANTE	49
3-8	BILAN THERMIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN A EAU	49
3-9	MODELISATION DES COEFFICIENT D'ECHANGE THERMIQUE	53
3-10	RENDEMENT INSTANTANE DU CAPTEUR.....	55
3-11	PERTES DE CHARGE	56
3-12	METHODE DE RESOLUTION.....	57
3-13	PROGRAMME PRINCIPAL D'UN CAPTEUR SOLAIRE	59
3-14	CONCLUSION.....	60

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

4-1	INTRODUCTION	62
4-2	VALIDATION.....	62
4-3	RESULTATS ET DISCUSSIONS	63
4.3.1	Evolution du rayonnement solaire.....	63
4.3.2	Variation de la température d'ambiance et du ciel.....	64
4.3.3	Températures de différents composants du capteur	64
4.3.4	Puissance utile et rendement instantané	66
4.3.5	Rendement instantané.....	66
4.3.6	Influence du débit sur le rendement	68
4-4	Etude parametrique.....	71
4.4.1	Température du fluide sortant	71

4.4.2	Température de l'absorbeur.....	72
4.4.3	Influence de la vitesse du vent sur le rendement.....	75
4.4.4	Influence de la température ambiante	77
4.4.5	Influence de l'épaisseur de l'isolant sur la température de sortie du fluide	79
4-5	CONCLUSION.....	80
	CONCLUSION GENERALE.....	82
	ANNEXE A	I
	ANNEXE B	IV
	REFERENCES	
	RESUME	

*LISTES DES
FIGURES ET DES
TABLEAUX*

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CAPTEURS SOLAIRES

FIGURE 1-1 CAPTEUR SOLAIRE PLAN 3

FIGURE 1-2 COUPE TRANSVERSALE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN..... 4

FIGURE 1-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN 9

FIGURE 1-4 CAPTEURS PLANS SANS VITRAGE 10

FIGURE 1-5 SCHEMA D'UN CAPTEUR SOLAIRE NON VITRE A REVETEMENT..... 10

FIGURE 1-6 CAPTEUR PLAN VITRE..... 11

FIGURE 1-7 SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS PLANS VITRENT 11

FIGURE 1-8 CAPTEUR SOUS VIDE..... 12

FIGURE 1-9 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS A TUBES SOUS VIDE 12

FIGURE 1-10 COUPE SCHEMATIQUE DU CAPTEUR CPC 13

FIGURE 1-11 DIFFERENTES PERTES THERMIQUES DANS UN CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE.....17

CHAPITRE 2 :

FIGURE 2-1 EVOLUTION DE COEFFICIENT DES PERTES THERMIQUES EN FONCTION DE L'EMISSIVITE20

FIGURE 2-2 EVOLUTION DE COEFFICIENT DES PERTES THERMIQUES EN FONCTION DE TEMPERATURE DE LA PLAQUE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS..... 21

FIGURE 2-3 COUPE TRANSVERSALE DU CAPTEUR A AIR 21

FIGURE 2-4 EVOLUTION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL INCLINE..... 22

FIGURE 2-5 PROFIL DE TEMPERATURES POUR LES T_{fs} ET T_{fe} 22

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

FIGURE 2-6 RENDEMENT INSTANTANE EN FONCTION DU TEMPS 22

FIGURE 2-7 EVOLUTION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL INCLINE 23

FIGURE 2-8 PROFIL DE TEMPERATURES (T_{fs} / T_{fe}) 23

FIGURE 2-9 REPRESENTATION DU RENDEMENT INSTANTANE 23

FIGURE 2-10 PLAQUES ABSORBANTES 24

FIGURE 2-11 DIAMETRE MAXIMUM ADOPTE A LA SECTION DE PASSAGE..... 24

FIGURE 2-12 VARIATION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL SUR UNE SURFACE INCLINEE..... 25

FIGURE 2-13 VARIATION DE LA TEMPERATURE DE SORTIE EN FONCTION DU TEMPS..... 25

FIGURE 2-14 VARIATION DE LA TEMPERATURE DE SORTIE EN FONCTION DU TEMPS 25

FIGURE 2-15 PLAQUE D'ABSORBEUR DE COMPENSATION A AILETTES RECTANGULAIRES 26

FIGURE 2-16 EFFICACITE EN FONCTION DU DEBIT MASSIQUE , AVEC AILETTES DE
LONGUEUR $L = 5 \text{ CM}$ 26

FIGURE 2-17 SCHEMATIQUE DES SIX MODELES DIFFERENTS DE CAPTEURS SOLAIRES A
AIR. 27

FIGURE 2-18 COMPARAISON DES RENDEMENTS THERMIQUES DES MODELES DE
CAPTEURS ETUDIES..... 28

FIGURE 2-19 COMPARAISON DES TEMPERATURES MOYENNES DE SORTIES DE L'AIR DES
MODELES DE CAPTEURS ETUDIE.....28

FIGURE 2-20 DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE L'AEROTHERME SOLAIRE.....29

FIGURE 2-21 DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE LA PLAQUE D'ABSORPTION ONDULEE
CROISEE ET DE LA PLAQUE INFERIEURE.....30

FIGURE 2-22 SOLUTIONS ANALYTIQUES DES EFFICACITES RELEVES ($T_{fi} - T_a$) 30

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

<i>FIGURE 2-23 SOLUTIONS ANALYTIQUES DES EFFICACITES RELEVÉES ($T_{fi}-T_a$) / CAS (C) REVETEMENTS SELECTIONNES SUR LES PLAQUES ABSORBANTES ET DE FOND.</i>	31
<i>FIGURE 2-24 CAPTEUR PLAN A AIR MUNI DE RUGOSITES CYLINDRIQUES</i>	31
<i>FIGURE 2-25 LES DIFFERENTS ARRANGEMENTS DES CHICANES CYLINDRIQUES</i>	32
<i>FIGURE 2-26 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU DEBIT</i>	32
<i>FIGURE 2-27 EVOLUTION DU RENDEMENT EN FONCTION DU DEBIT</i>	32
<i>FIGURE 2-28 CONCEPTION DES CAPTEURS A AEROGEL DE SILICE</i>	33
<i>FIGURE 2-29 SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL</i>	34
<i>FIGURE 2-30 SCHEMA DESCRIPTIF DES CHICANES</i>	34
<i>FIGURE 2-31 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU CAPTEUR EN FONCTION DU TEMPS</i>	35
<i>FIGURE 2-32 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU CAPTEUR EN FONCTION DU TEMPS</i>	35
 CHAPITRE 3 : MODELISATION THERMIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN	
<i>FIGURE 3-2 SCHEMAT DU CAPTEUR SOLAIRE ETUDIÉ</i>	38
<i>FIGURE 3-2 LES COORDONNEES HORAIRES</i>	40
<i>FIGURE 3-3 COORDONNEES HORIZONTALES DU SOLEIL</i>	41
<i>FIGURE 3-4 DEFINITION DES COORDONNEES TERRESTRE D'UN LIEU DONNE</i>	42
<i>FIGURE 3-5 RAYONNEMENT DIRECT, DIFFUS ET GLOBAL</i>	45
<i>FIGURE 3-6 SCHEMA ELECTRIQUE QUI REPRESENTE LES ECHANGES THERMIQUES AVEC LE VITRE</i>	50
<i>FIGURE 3-7 SCHEMA ELECTRIQUE QUI REPRESENTE LES ECHANGES THERMIQUES AVEC LA LAME D'AIR</i>	50

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

<i>FIGURE 3-8 SCHEMA ELECTRIQUE REPRESENTANT LES ECHANGES THERMIQUES AVEC LE FLUIDE CALOPORTEUR</i>	<i>51</i>
<i>FIGURE 3-9 SCHEMA ELECTRIQUE REPRESENTANT LES ECHANGES THERMIQUES AVEC L'ABSORBEUR.....</i>	<i>52</i>
<i>FIGURE 3-10 SCHEMA ELECTRIQUE QUI REPRESENTE LES DIFFERENTS ECHANGES THERMIQUES AVEC L'ISOLANT.....</i>	<i>52</i>

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

<i>FIGURE 4-1 VARIATION DE LA TEMPERATURE DU FLUIDE SORTANT EN FONCTION DU TEMPS</i>	<i>62</i>
<i>FIGURE 4-2 EVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE EN FONCTION DU TEMPS</i>	<i>63</i>
<i>FIGURE 4-3 VARIATION DE LA TEMPERATURE D'AMBIANCE ET DU CIEL EN FONCTION DU TEMPS</i>	<i>64</i>
<i>FIGURE 4-4 VARIATION TEMPORELLE DES TEMPERATURES DE DIFFERENTS COMPOSANTS DU CAPTEUR</i>	<i>65</i>
<i>FIGURE 4-5 VARIATION TEMPORELLE DE LA PUISSANCE UTILE</i>	<i>66</i>
<i>FIGURE 4-6 VARIATION TEMPORELLE DU RENDEMENT INSTANTANE</i>	<i>66</i>
<i>FIGURE 4-7 VARIATION DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DU TEMPS</i>	<i>67</i>
<i>FIGURE 4-8 VARIATION DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DU TEMPS</i>	<i>67</i>
<i>FIGURE 4-9 INFLUENCE DU DEBIT SUR LE RENDEMENT</i>	<i>68</i>
<i>FIGURE 4-10 INFLUENCE DE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE SUR LE RENDEMENT</i>	<i>69</i>
<i>FIGURE 4-11 INFLUENCE DE NOMBRE DE REYNOLDS SUR LE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE</i>	<i>69</i>
<i>FIGURE 4-12 INFLUENCE DE NOMBRE DE REYNOLDS SUR LE RENDEMENT</i>	<i>70</i>
<i>FIGURE 4-13 VARIATIONS TEMPORAILLE DU TEMPERATURE DU FLUIDE SORTANT</i>	<i>71</i>

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

<i>FIGURE 4-14 VARIATIONS TEMPORAIRE DU TEMPERATURE DE L'ABSORBEUR</i>	72
<i>FIGURE 4-15 VARIATION DE PUISSANCE UTILE AVEC LE TEMPS</i>	73
<i>FIGURE 4-16 INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE SUR LA PUISSANCE UTILE</i>	74
<i>FIGURE 4-17 INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE SUR LE RENDEMENT</i>	74
<i>FIGURE 4-18 INFLUENCE DE LA VITESSE DU VENT SUR LE RENDEMENT</i>	75
<i>FIGURE 4-19 INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LA TEMPERATURE DU FLUIDE A SA SORTIE DU CAPTEUR EN FONCTION DU DEBIT</i>	76
<i>FIGURE 4-20 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR LE TEMPERATURE DU FLUIDE SORTANT</i>	77
<i>FIGURE 4-21 INFLUENCE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES SUR LA TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE</i>	78
<i>FIGURE 4-22 INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE LA VITRE SUR LA TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE</i>	78
<i>FIGURE 4-23 INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SUR LA TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE</i>	79

LISTES DES TABLEAUX

<i>TABLEAU 2-1 RENDEMENT MOYEN DES DEUX SYSTEMES</i>	25
<i>TABLEAU 2-2 DONNEES EXPERIMENTALES ET RESULTATS DES CALCULS</i>	37
<i>TABLEAU 3-1 ELEMENTS DU CAPTEUR ET LEURS CARACTERISTIQUES</i>	39
<i>TABLEAU 3-2 COEFFICIENT DE TROUBLE DE CIEL</i>	43
<i>TABLEAU 3-3 EXPRESSION DES DIFFERENTES CONDUCTANCES</i>	48

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

SYMBOLE	UNITE	DESIGNATION
a, b		Coefficients de trouble
alb		Albédo du sol
C_{p_f}	$J/(kg.K)$	Capacité calorifique du fluide à pression constante
$C_{p_{abs}}$	$J/(kg.K)$	Capacité calorifique de l'absorbeur à pression constante
C_{p_v}	$J/(kg.K)$	Capacité calorifique de la vitre à pression constante
h	<i>Degré ; rad</i>	hauteur du soleil.
$h_{cv_{abs}_f}$	$W/(m^2.K)$	Coeff. de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur
$h_{cv_v_{amb}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'ambiance dû au vent
$h_{cv_v_{air}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert dû à la convection naturelle de la lame d'air immobile
$h_{cv_{is}_{amb}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert convectif entre l'isolant et l'ambiance dû au vent
h_{c_v}	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'ambiance due au vent
h_d	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert par conduction entre l'absorbeur et l'isolant
$h_{ry_v_{abs}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre
$h_{ry_v_{ciel}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le ciel
$h_{ry_v_{sol}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le sol
$h_{ry_{is}_{sol}}$	$W/(m^2.K)$	Coefficient de transfert radiatif entre l'isolant et le sol
C	W/m^2	Constante solaire
D	m	Diamètre du tube
I_{difc}	W/m^2	Eclairement solaire diffus provient du ciel sur un plan horizontal
I_{difs}	W/m^2	Eclairement solaire diffus provient du sol sur un plan horizontal
I_{dirh}	W/m^2	Eclairement solaire direct sur un plan horizontal
I_t	W/m^2	Eclairement solaire globale incident
j	---	Nombre de jour
L	m	Longueur de la conduite
m_i	kg	Masse du milieu d'indice i
\dot{m}	kg/s	Débit massique du fluide caloporteur

NOMENCLATURE

S_i	m^2	Surface du milieu d'indice i
S_c	m^2	Surface du capteur
S_t	m^2	Section de passage du fluide caloporteur dans le tube
δP_L	N/m^2	Pertes de charge linéaire
P_U	W	Puissance utile
P_{ab}	W	La puissance solaire arrivant sur le capteur
R_s	---	Facteur de correction sur l'éclairement diffus par le sol.
R_c	---	Facteur de correction sur l'éclairement diffus par ciel.
R_b	---	Facteur de correction sur l'éclairement incident directe.
T_{amb}	$^{\circ}C$ ou K	Température de l'air ambiant
T_{ciel}	$^{\circ}C$ ou K	Température équivalente du ciel
T_{fm}	$^{\circ}C$ ou K	Température moyenne du fluide caloporteur
T_{fe}	$^{\circ}C$ ou K	Température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur
T_{fs}	$^{\circ}C$ ou K	Température du fluide caloporteur à sa sortie du capteur
T_{abs}	$^{\circ}C$ ou K	Température de l'absorbeur
T_v	$^{\circ}C$ ou K	Température de la vitre ou de la couverture transparente
$T_{lame\ d'air}$	$^{\circ}C$ ou K	Température de l'air entre la vitre et l'absorbeur
TSV	s ou $heure$	Temps solaire vrai ou local
V_v	m/s	Vitesse du vent
V	m/s	La vitesse moyenne du fluide dans la conduite

Nombres adimensionnels	UNITE	DESIGNATION
Nu	---	Nombre de <i>Nusselt</i> .
Pr	---	Nombre de <i>Prandtl</i> .
Re	---	Nombre de <i>Reynolds</i> .
Gz	---	Nombre de <i>Graetz</i> .

NOMENCLATURE

Letters Grecques

Lettre	Désignation	Unité
α	Azimut d'un plan.	Degré
α_v	Coefficient d'absorptivité de la vitre.	
α_{abs}	Coefficient d'absorptivité de l'absorbeur.	
β	L'inclinaison d'un plan par rapport à un plan horizontal.	Degré
δ	La déclinaison du soleil.	Degré
ε	Coefficient de rugosité du paroi	
ε_v	Emissivités du vitre	
ε_{abs}	Emissivités de l'absorbeur	
φ	Latitude du lieu.	Degré
η_i	Rendement instantané du capteur solaire plan.	
λ	Coefficient de perte de charge	
μ_f	Viscosité dynamique du fluide caloporteur	$kg/(m.s)$
θ	Angle d'incidence des rayons solaires pour une orientation sud	Degré
ρ_{abs}	Masse volumique de l'absorbeur	kg/m^3
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	kg/m^3

NOMENCLATURE

ρ_f	Masse volumique du fluide caloporteur	kg/m^3
ρ_v	Masse volumique de la vitre	kg/m^3
ω	Angle horaire.	Degré
τ_v	Coefficient de transmission de la vitre.	
τ_{dir}	La transmissivité totale de l'atmosphère	
σ	Constante de Stefan -Boltzmann ($5,67.10^{-8}$)	$[W / (m^2.K^4)]$

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur la terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes.

L'énergie solaire reste toujours une source non négligeable d'économie d'énergie, surtout pour les conditions où l'ensoleillement est abondant et l'énergie conventionnelle est plus coûteuse.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan à eau.

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire plan à eau.

Le présent travail comporte quatre chapitres

- Le premier chapitre est consacré à donner quelques notions générales sur les capteurs solaire (ses différents composants, ses classifications, principe de leurs fonctionnements,)
- Une recherche bibliographique sur les capteurs solaires a été l'objet du deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes équations gouvernant le fonctionnement du capteur solaire étudié en régime instationnaire ainsi que nous présentons la méthode de résolution du système d'équations différentielles obtenu à partir du bilan énergétique de chaque constituant du capteur étudié.
- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES

CAPTEURS

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CAPTEURS**SOLAIRES**

1-1 INTRODUCTION

Les capteurs solaires transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par fluide en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires.

Dans ce chapitre nous allons donner quelques notions générales sur les capteurs solaires et leurs constituants ainsi que leurs domaines d'application.

1-2 DEFINITION D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

Le capteur solaire est un système énergétique qui permet de convertir l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation. il combine deux principes physiques : les effets de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire, et du corps noir [1].

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 90°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur [2].



FIGURE 1-1 : CAPTEUR SOLAIRE PLAN

1-3 CONSTITUANTS D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

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.

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente (vitre), d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre comme le montre la figure1-2

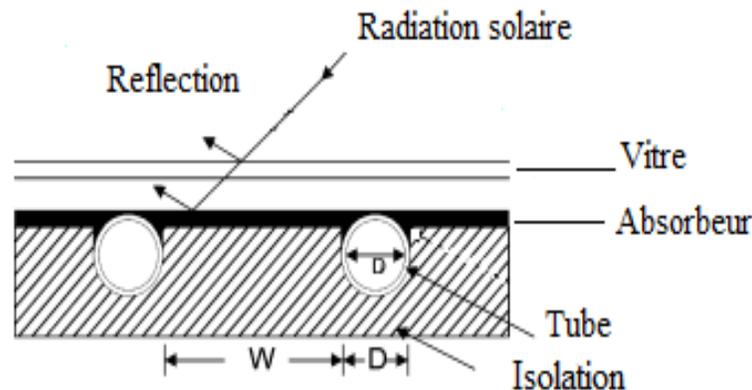


FIGURE 1-2 : COUPE TRANSVERSALE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

1-3.1 Couverture transparente (vitrage)

C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R., permettant de réaliser un effet de serre.

Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles [3]

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion Importante
- Transmettre la plupart du rayonnement reçu
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre simple ou traité qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse [4].

L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'augmenter son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C, en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur et évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent [5].

1-3.2 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 énergie calorifique [1].

Les absorbeurs sont généralement réalisés avec des feuilles minces de métaux présentant une bonne conductibilité et une bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, la plupart du temps, les absorbeurs sont réalisés au moyen d'un support en cuivre de 0,2 mm et sont recouverts par un traitement de surface [5].

Deux fonctions incombent à l'absorbeur [5] :

1. absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible
2. transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes [1,6] :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- Une bonne résistance à la corrosion

De plus, il devra être le plus léger possible afin de limiter l'inertie de mise en régime et construit avec un bon matériau conducteur [7].

L'absorbeur en général est disposé de 25 mm à 30 mm d'isolant.

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement [6].

Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [6].

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact [6].

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. [1].

Ces types de surfaces absorbant au maximum et réémettant au minimum ont été nommées surfaces « sélectives » [7].

La sélectivité de l'absorbeur est très importante; elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques telles que le rayonnement solaire est très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) est limité [7].

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

- α : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)
- ε : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

1-3.3 Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire a pour rôle de véhiculer la chaleur cédée par l'absorbeur, différents fluides peuvent être utilisée mais doit satisfaire à des certaines conditions [7] :

- Grande capacité calorifique.
- Faible viscosité.
- Coefficient de transfert thermique élevé.
- Haute point de d'ébullition est bas point de congélation.

- Degré d'agressivité faible devant les matériaux constituant le capteur.

Les fluides caloporteurs les plus utilisés sont :

Air : L'air comme agent de transport de calories à un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie est moins de travaux d'entretien.

Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut utiliser des volumes d'air très importants.

Eau : Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des problèmes.

La naissance des couches de tartre dans les canalisations au fil de temps diminue la quantité de chaleur échangées.

Gilotherms : Des liquides organiques à base de polyphényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires traités pour ne pas présenter les mêmes défauts que l'eau, leur chaleur massique est 0,5Kcal/Kg.K.

Ces hydrocarbures se détériorent en présence des traces d'eau ou d'air, elles font la combustion pour des hautes températures.

1-3.4 Isolation thermique

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes [8]:

- **Partie avant de l'absorbeur**

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [8].

- **Parties arrière et latérale**

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, Sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture.

En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [8].

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs, mais il faut veiller à la tenue de la température, car une coupure de circulation du fluide caloporteur peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150°C [7].

Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

Un bon isolant doit les qualités suivantes :

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

1-3.5 Coffre

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolant du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques [5].

1-4 FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple [2,4].

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe.

En effet, tout corps chaud émet des rayonnements aux températures usuelles, celui-ci se trouve dans le domaine de l'infrarouge. Le fluide qui circule dans les tubes de cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur.

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

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

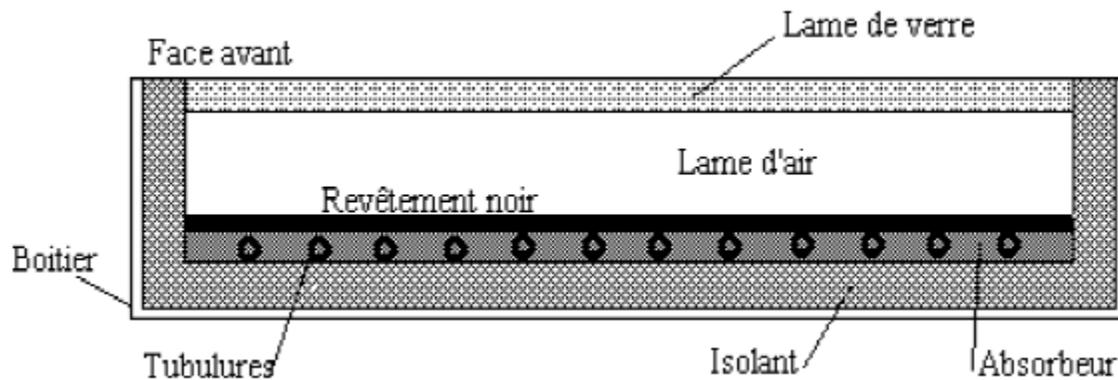


FIGURE 1-3 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN [9]

1-5 TYPES DES CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES

1-5.1 Les capteurs solaires plans non vitrés

Il s'agit de la technologie la plus simple. Ces capteurs sont constitués d'une surface réceptrice qui absorbe le rayonnement solaire direct et diffus (appelé absorbeur) pour le transmettre au fluide caloporteur qui circule dans un réseau de tubes et directement en contact avec la surface absorbante.

Les capteurs plans sans vitrage se présentent généralement sous forme d'une moquette de tubes noirs figure I.3, en matière synthétique résistante aux ultraviolets et très facile à mettre en place. Ces capteurs ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C) [10].

Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée [9].



FIGURE I-4 : CAPTEURS PLANS SANS VITRAGE

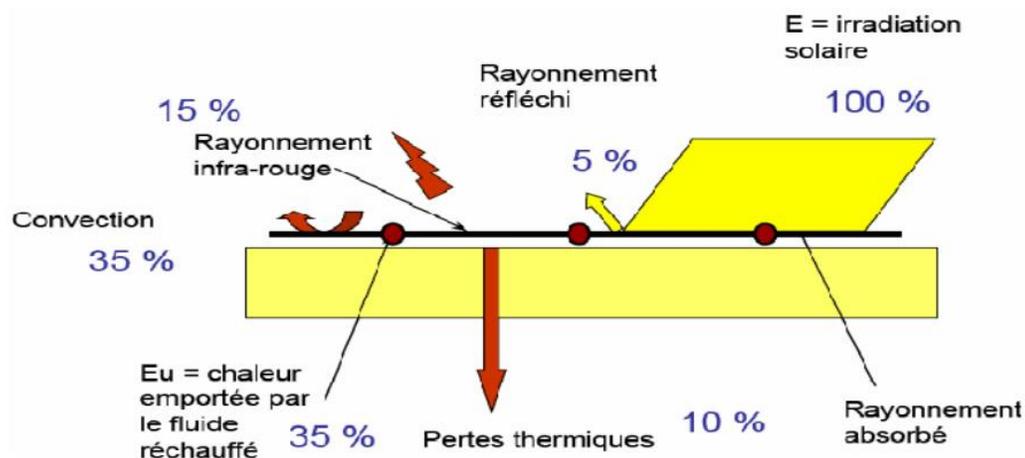


FIGURE I-5 : SCHEMA D'UN CAPTEUR SOLAIRE NON VITRE A REVETEMENT

SELECTIF [6]

1-5.2 Les capteurs solaires plans vitrés

Les capteurs plans vitrés sont les plus répandus du fait de leurs meilleures performances dues à une meilleure isolation mais aussi des avancées techniques réalisées sur la qualité de l'absorbeur qui est une surface sélective fortement absorbante dans le visible et faiblement émissive dans l'infrarouge. Le vitrage est destiné à limiter les pertes thermiques convectives et radiatives. La vitre permet de créer un effet de serre dans le capteur grâce à la propriété du verre pratiquement opaque dans l'infrarouge réduisant ainsi l'échange avec le milieu extérieur. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air [10].

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C et jusqu'à 100°C dans le cas des doubles vitrages. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, pour le chauffage des locaux aussi l'air de ventilation [9].



FIGURE 1-6 : CAPTEUR PLAN VITRE

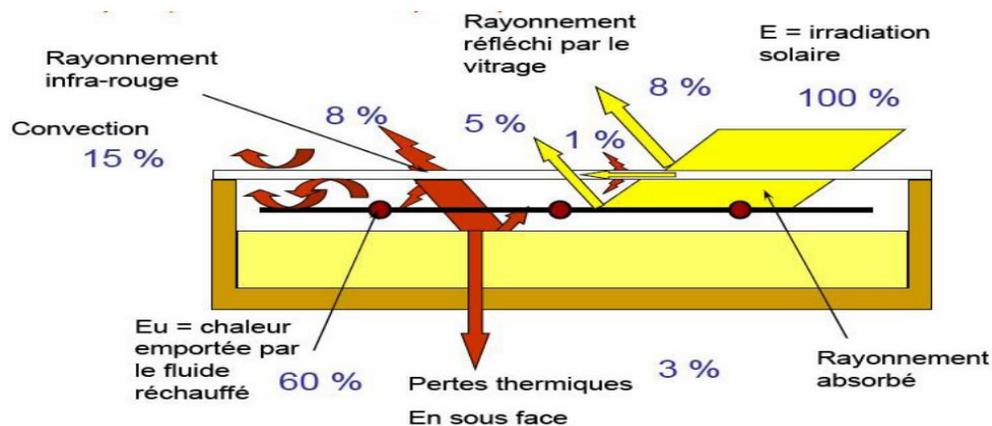


FIGURE 1-7 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS PLANS VITRENT [6]

1-5.3 Les capteurs sous vide

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevée (supérieure à 100°C). Ils se présentent sous la forme de tubes de faible diamètre (quelques centimètres) dans lesquels est placé l'absorbeur. L'intérieur du tube est vidé de son air. La surface de l'absorbeur est recouverte d'une couche dite sélective et le verre est traité de sorte à éviter les émissions infrarouges [10].

Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques par convection entre l'absorbeur et la paroi du tube. L'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration [8].

Ces capteurs conviennent bien à la production d'EC (eau chaude) en montagne ou dans les pays du nord compte tenu de leur bon rendement pour des températures extérieures basses figure I.7[8].



FIGURE 1-8 : CAPTEUR SOUS VIDE

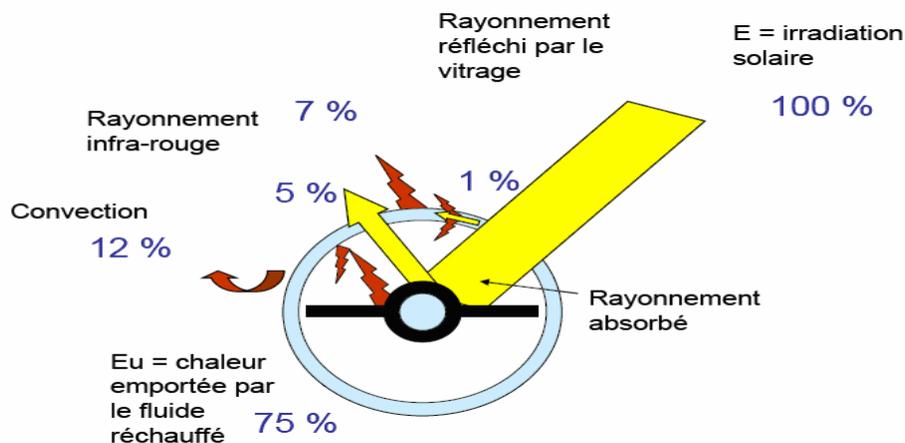


FIGURE 1-9 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS A TUBES SOUS VIDE [6]

1-5.4 Capteur CPC (Compound Parabolic Concentration)

C'est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur a segments paraboliques" figure I.9. Les réflecteurs CPC ont une géométrie qui permet au rayonnement solaire direct et diffus d'atteindre l'absorbeur, car la surface de l'absorbeur est cylindrique couvrant la totalité de la surface du tube intérieur. Ainsi, la partie face au soleil peut capter le rayonnement direct et la partie cachée peut capter le rayonnement par réflexion [11].

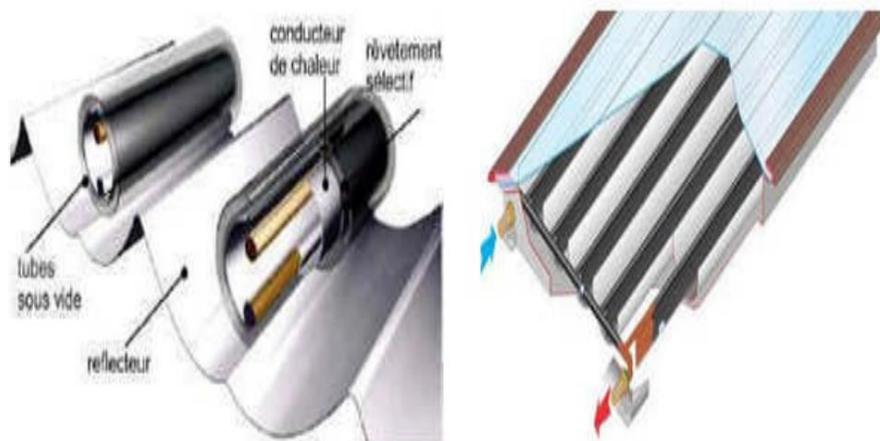


FIGURE 1-10: COUPE SCHEMATIQUE DU CAPTEUR CPC [11]

1-6 LES DIFFERENTS PARAMETRES INFLUANT SUR LE RENDEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

1-6.1 Les paramètres externes

Qui sont principalement [1] :

➤ Les paramètres d'ensoleillement

Parmi lesquels on distingue notamment :

- Eclairage énergétique dû au rayonnement global.

- Position du soleil et durée d'insolation.
- L'heure de la journée et la saison.
- La position géographique du lieu considéré (latitude)
 - Température ambiante.
 - Vitesse du vent :

La vitesse du vent apparaît dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur qui agit sur la valeur des pertes, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est important. Lorsque le coefficient de transfert thermique dû au vent est à son maximum (pour une longueur de 1m d'absorbeur noir installé horizontalement) la réduction maximum de l'efficacité s'avère au plus bas niveau [12].

➤ Obstacles

Il s'agit avant tout des constructions et de la végétation, leur position dans la trajectoire solaire peut créer sur les surfaces captatrices une ombre nuisible au bon fonctionnement de l'installation [12].

1-6.2 Les paramètres internes

Qui sont principalement [1] :

➤ Paramètres géométriques

On peut citer

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
 - Capteur fixe ou suiveur du soleil
 - Dimension de différentes parties : épaisseur, longueur et largeur.
- Paramètres de construction:

Qui sont principalement :

1. L'absorbeur

Parmi lesquels on distingue notamment

- Les propriétés thermophysiques et optiques.
- Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
- Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
- Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur
- Température de l'absorbeur
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant

L'augmentation de la surface du capteur accroît le taux du rayonnement solaire intercepté et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (augmentation de la surface d'échange), mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur [4].

2. Couverture transparente :

- Propriétés optiques et thermophysiques
- Epaisseur
- Le nombre de vitrage et la forme

Le verre est tout à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisqu'il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une amélioration de l'efficacité thermique du capteur. Mais son utilisation possède aussi des inconvénients qui sont, son coût élevé et sa fragilité pendant le transport et en service, c'est la raison pour laquelle, pendant plusieurs années des couvertures en plastique transparent ont été appliquées largement pour construire des capteurs solaires de coût modéré et rigides [12].

3. L'isolant

- Propriétés thermophysiques et optiques
- Epaisseur

Les pertes de chaleur principales du capteur sont de la couverture, puisque les cotées et le dos peuvent être isolés, alors que la face avant doit être exposée au rayonnement solaire et à la température ambiante. C'est pour cela l'air est utilisé fréquemment comme une isolation contre les pertes de chaleur conductrices et convectives de l'absorbeur vers la vitre [4].

4. Fluide caloporteur

- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit
- Température d'entrée
- Propriétés thermophysiques.

1-7 PERTES THERMIQUES DANS UN CAPTEUR SOLAIRE

Les pertes thermiques au niveau du capteur solaire peuvent avoir lieu par l'intervention des trois modes de transfert thermique: convection, conduction et rayonnement.

1-7.1 Pertes par convection

Ce mode de transfert intervient généralement entre la couverture et le milieu extérieur, le coefficient de pertes thermiques augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, sa température, et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, alors qu'il diminue avec l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre. Les obstacles soudés à l'absorbeur peuvent réduire les pertes par l'avant en diminuant la température de l'absorbeur [4].

1-7.2 Pertes par conduction

Les pertes par conduction peuvent avoir lieu entre l'absorbeur et la vitre lorsque ces derniers se trouvent sur une très faible distance, comme elles existent au niveau de l'isolation de la partie arrière et latérale du capteur [4].

1-7.3 Pertes par rayonnement

Les matériaux utilisés comme couvertures laissent passer le rayonnement solaire incident mais ils sont opaques au rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100 C (c'est l'effet de serre), la face interne de la couverture absorbe ce rayonnement infrarouge, puis elle subit une augmentation de température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur et moitié vers l'absorbeur. Donc, les pertes par rayonnement sont diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs couvertures [4].

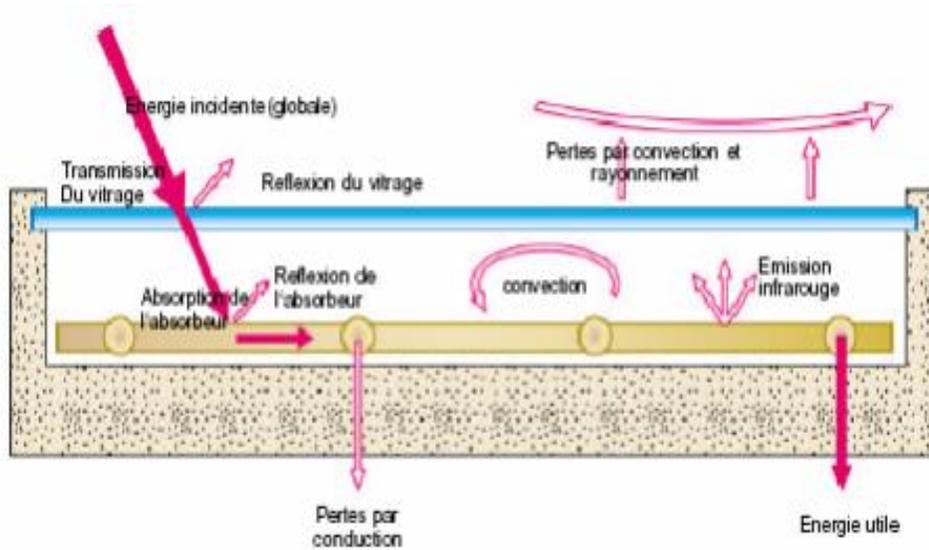


FIGURE 1-11: DIFFERENTES PERTES THERMIQUES DANS UN CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE

1-8 PERTES DE CHARGE

Les pertes de charge représentent la chute de pression totale due aux divers frottements inévitables subis par l'eau en mouvement. Elles sont principalement fonction de la vitesse du fluide. Une faible perte de charge du capteur permet d'assurer un écoulement suffisant du fluide en circulation naturelle [9].

1-9 LE CORPS NOIR

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quel que soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions [13].

1-10 EFFET DE SERRE

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 [5].

1-11 DOMAINE D'APPLICATIONS DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN

Chauffages solaire.

Climatisation solaire.

Séchage solaire.

Distillation solaire.

Dessalement solaire.

Refroidissement solaire.

1-12 CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre une étude générale sur les capteurs solaires et tous qui dépendent de ses types, ses composantes, le principe de son fonctionnement, les facteurs influant sur leur efficacité, et le domaine d'utilisation de chacun un.

CHAPITRE 2

RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES CAPTEURS SOLAIRES

CHAPITRE 2 : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES CAPTEURS SOLAIRES

2-1 INTRODUCTION

L'amélioration des performances des capteurs solaires consiste à limiter les déperditions thermiques entre l'absorbeur et l'environnement et à augmenter la quantité d'énergie absorbée avec un choix judicieux des composants des capteurs. Ainsi, un certain nombre de travaux ont été faits sur les capteurs solaires dans le but est d'améliorer leur efficacité

2-2 PRESENTATION DE QUELQUES TRAVAUX CONCERNANT LES CAPTEURS SOLAIRES

Benkhelifa 1998 [14] à présenter un modèle mathématique permettant de calculer les pertes thermiques vers l'avant d'un capteur solaire plan. Il a exploité un programme de calcul pour étudier l'influence de quelques paramètres physiques et géométriques sur le coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur. Ainsi, il a montré que le coefficient de pertes thermiques vers l'avant augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, de la température de la plaque absorbante et du coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, et il diminue avec l'augmentation de la distance entre l'absorbeur et le vitrage.

Voici quelques leurs résultats obtenus :

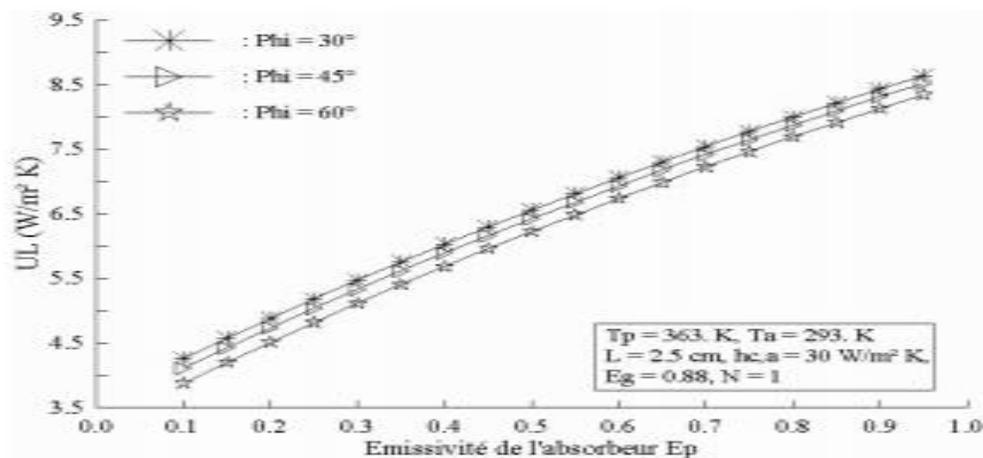


FIGURE 2-1 : EVOLUTION DE COEFFICIENT DES PERTES THERMIQUES EN
FONCTION DE L'EMISSIVITE

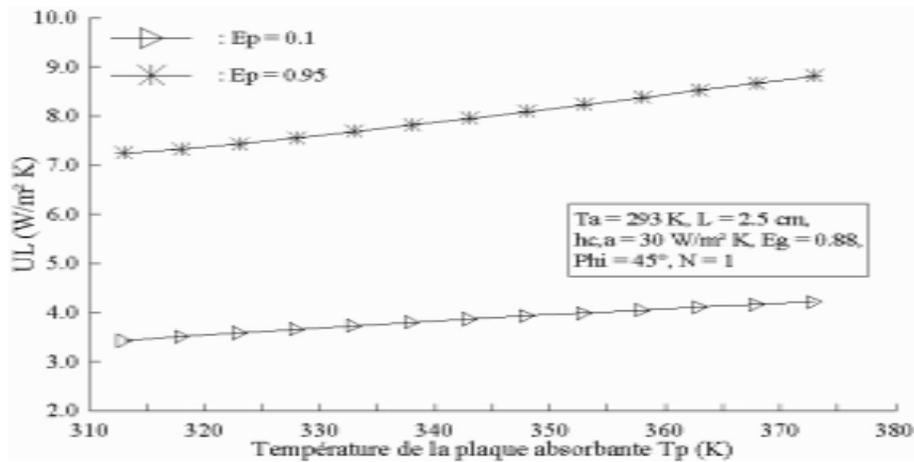


FIGURE 2-2 : EVOLUTION DE COEFFICIENT DES PERTES THERMIQUES EN FONCTION DE TEMPERATURE DE LA PLAQUE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS

F. Moukhtari et D. Semmar 1999 [15], ont fait une étude expérimentale d'un capteur solaire à air. Ils ont choisi un capteur avec le passage d'air situé entre l'absorbeur et l'isolant. Ils ont présenté les résultats des essais effectués sur le capteur solaire à air. En premier lieu, ils ont donné la méthode de réalisation du modèle expérimental en se référant aux modèles standards des capteurs à air, ensuite une campagne de mesures a été menée afin de juger les performances thermiques de ce système. Les paramètres mesurés ils permettent d'appuyer l'analyse théorique, ils valoriser son capteur solaire à air, et pour une éventuelle utilisation de son capteur dans le séchage des produits agro-alimentaires.

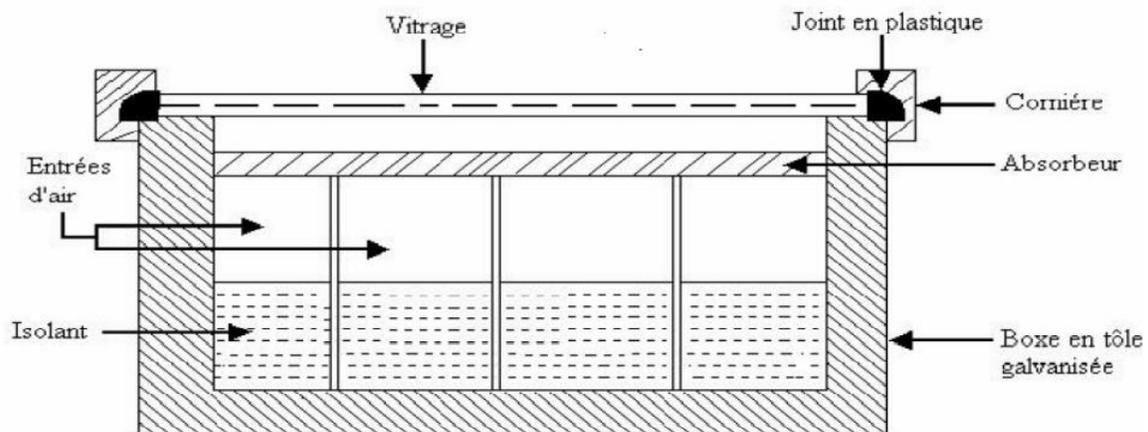


FIGURE 2-3 : COUPE TRANSVERSALE DU CAPTEUR A AIR

Les résultats sont présentés sous forme des graphes pour deux types de convection naturelle et forcée.

CONVECTION NATURELLE

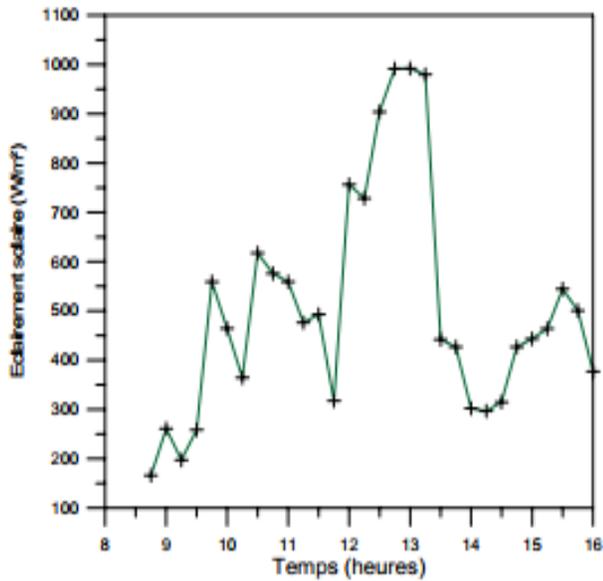


FIGURE 2-4: EVOLUTION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL INCLINE

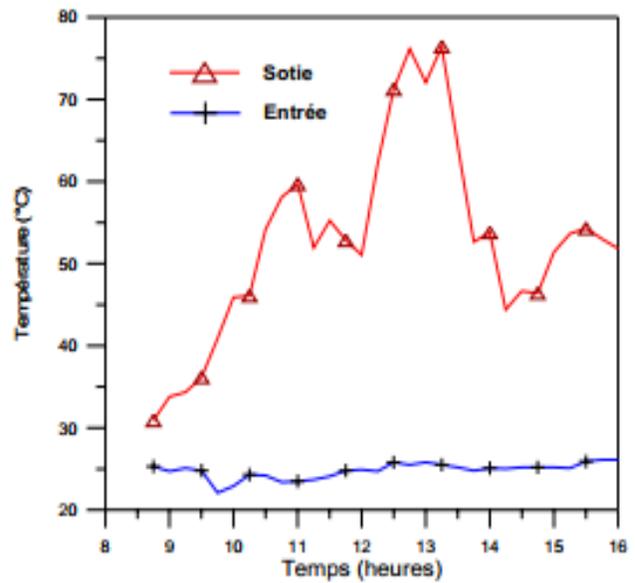


FIGURE 2-5 : PROFIL DE TEMPERATURES POUR LES T_{fs} ET T_{fe}

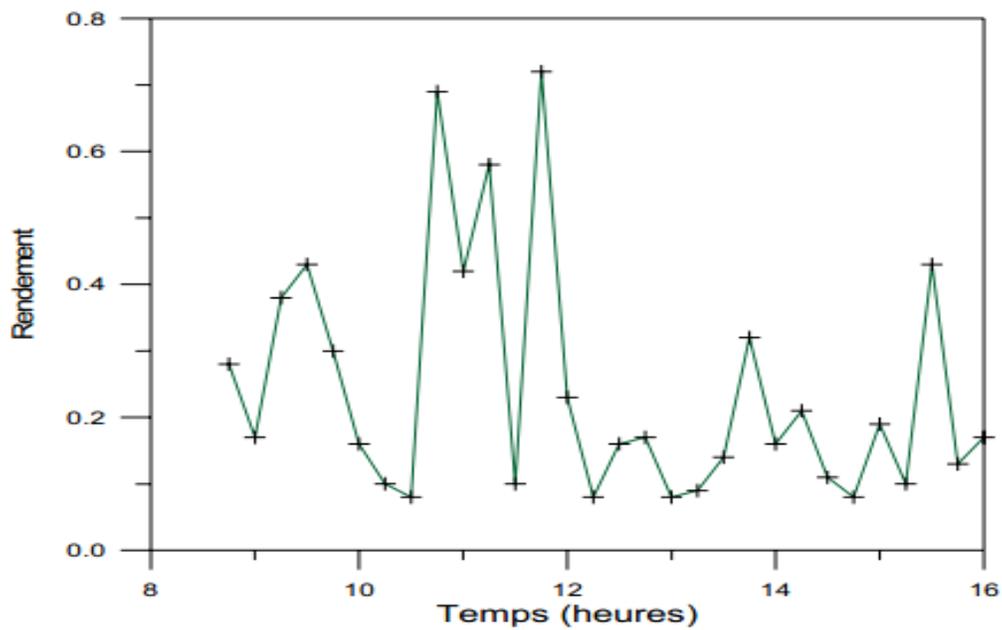


FIGURE 2-6 : RENDEMENT INSTANTANE EN FONCTION DU TEMPS.

CONVECTION FORCEE

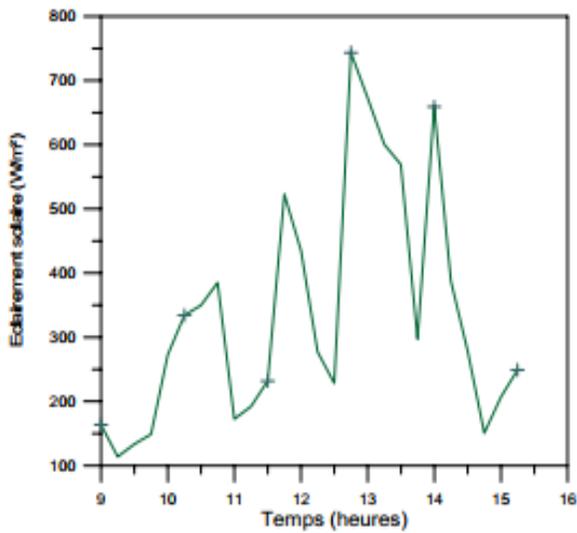


FIGURE 2-7 : EVOLUTION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL INCLINE

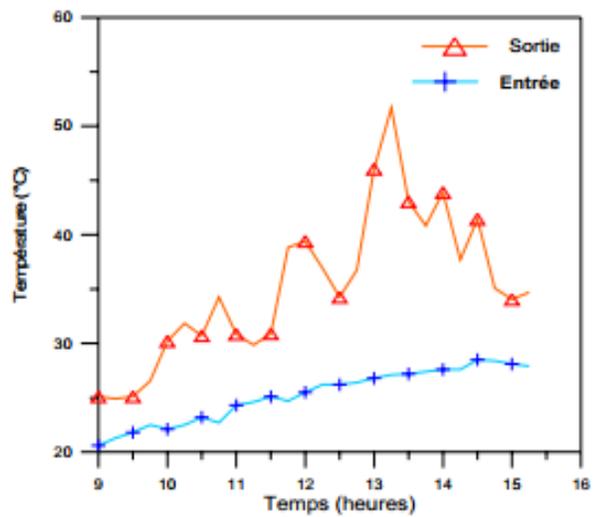


FIGURE 2-8 : PROFIL DE TEMPERATURES (TFS / TFE)

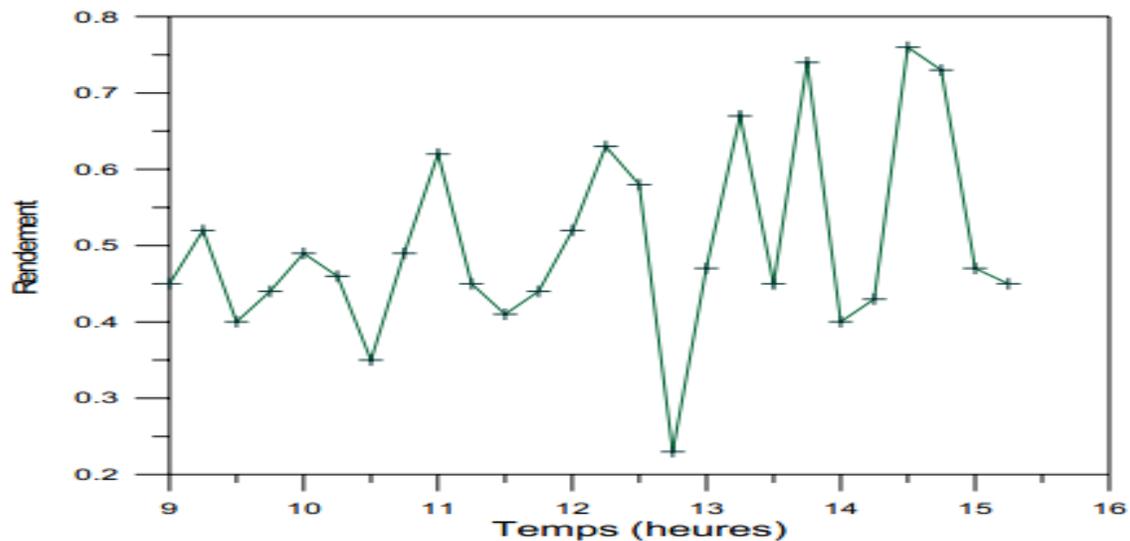


FIGURE 2-9: REPRESENTATION DU RENDEMENT INSTANTANE

Les résultats présentés dans ce document nous permettent de tirer les conclusions suivantes

- La température de sortie du fluide varie en fonction du flux solaire.
- Leur conception a permis d'obtenir des températures du fluide assez élevé à la sortie, favorable pour les exploiter dans le séchage des produits agro-alimentaires.

- Ces résultats expérimentaux nous aiderons à une éventuelle analyse théorique du système expérimental.

Abdi et Messaouden 2000 [16] ont menés une étude expérimentale et théorique des performances de deux types de capteurs plans avec des formes différentes de la plaque d'absorption. Ils ont principalement étudié l'effet de la forme géométrique du passage du fluide (forme convexe et forme concave) sur l'efficacité des capteurs dans le cas d'un contact direct eau-plaque absorbante. Par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux ils ont montrés que le capteur muni d'une plaque absorbante de forme convexe donne un meilleur rendement qu'une plaque absorbante de forme concave.

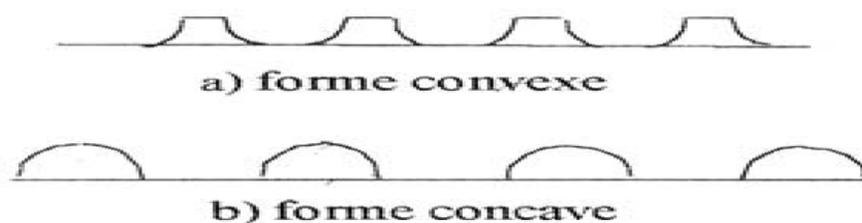


FIGURE 2-10: PLAQUES ABSORBANTES



FIGURE 2-11: DIAMETRE MAXIMUM ADOPTE A LA SECTION DE PASSAGE

Par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux ils ont montrés que le capteur muni d'une plaque absorbante de forme convexe donne un meilleur rendement qu'une plaque absorbante de forme concave.

TABLEAU 2-1 : RENDEMENTS MOYENS DES DEUX SYSTEMES

Rendement %	Convexe	Concave
Théorique du capteur	63.13	59.83
Expérimental du capteur	58.002	54.87
Théorique du chauffe-eau solaire	58.45	55.39
Expérimental du chauffe-eau solaire	55.73	53.18

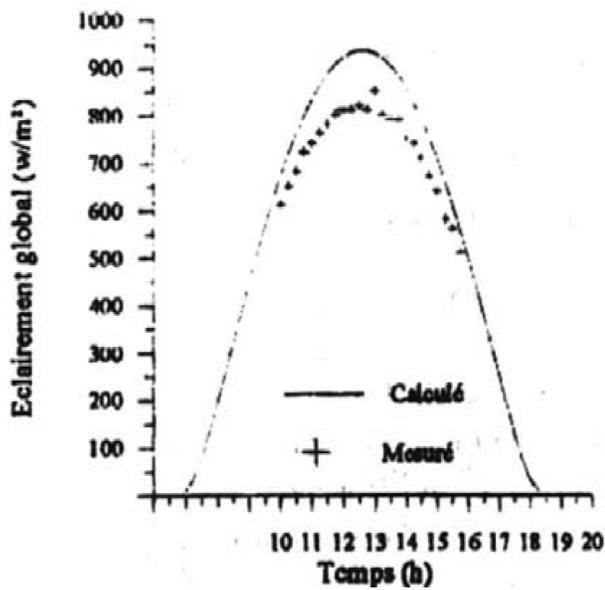


FIGURE2-12: VARIATION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL SUR UNE SURFACE INCLINEE

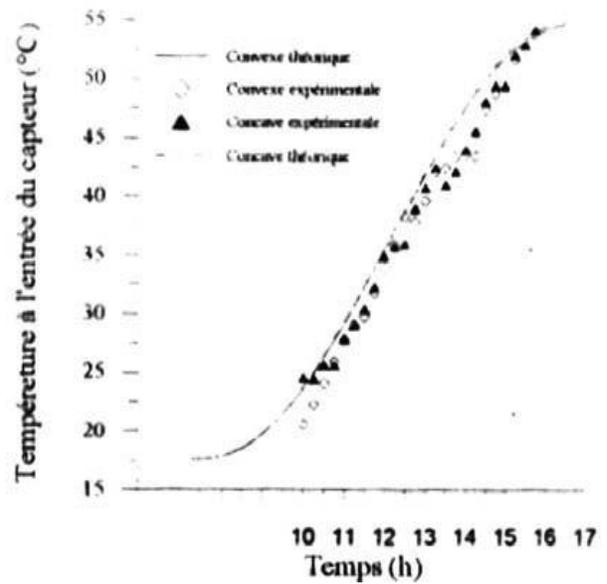


FIGURE 2-13: VARIATION DE LA TEMPERATURE DE SORTIE EN FONCTION DU TEMPS

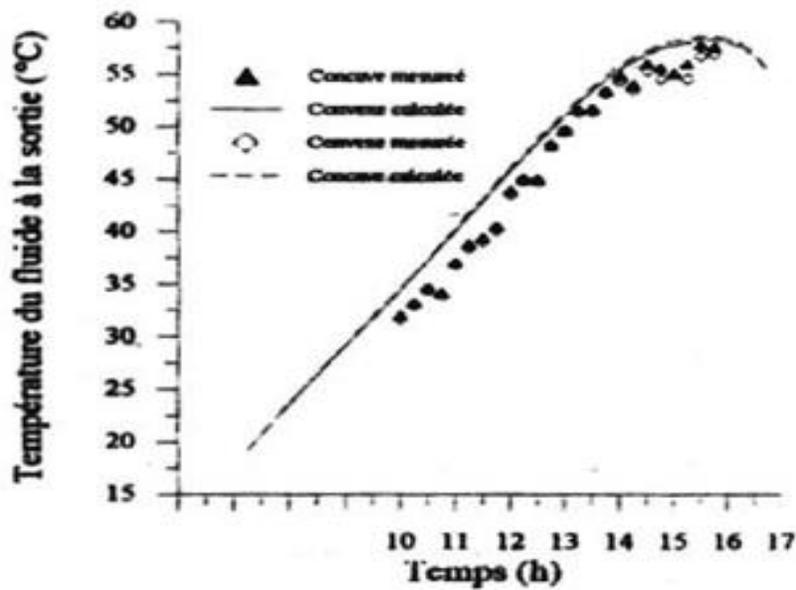


FIGURE 2-14 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE SORTIE EN FONCTION DU TEMPS

S. Youcef-Ali 2005 [17] a fait une étude expérimentale sur un capteur solaire, auquel il introduit des plaques minces rectangulaires orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur. L'objectif principal de cette étude est d'augmenter la surface d'échange totale afin d'améliorer les performances thermiques. L'étude compare aussi expérimentalement le cas d'un capteur à doubles couvertures à celui d'un capteur à triples couvertures.

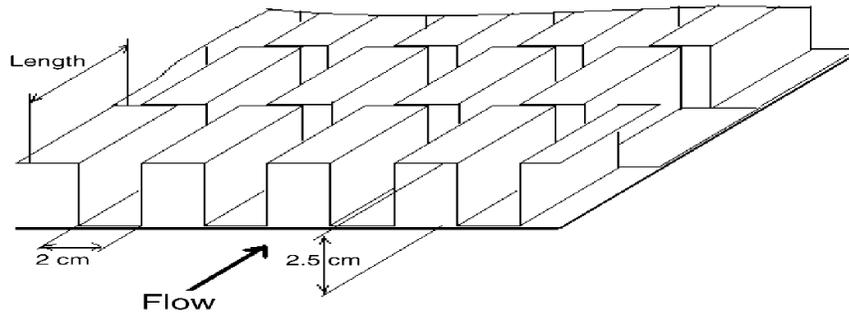


FIGURE2-15 : PLAQUE D'ABSORBEUR DE COMPENSATION A AILETTES RECTANGULAIRES

Il a trouvé que la couverture triple réduit plus les pertes de chaleur vers l'avant et donne des performances thermiques plus importantes que celles à doubles couvertures. Il a montré aussi que les obstacles ajoutés peuvent réduire les pertes en diminuant la température de l'absorbeur et aussi augmentent le transfert thermique entre l'absorbeur et l'air ce qui réduit ses pertes vers l'extérieur, et par conséquent un rendement supérieur à celui d'un capteur avec un absorbeur plat et simple grâce à l'obtention des quantités de chaleur plus élevées.

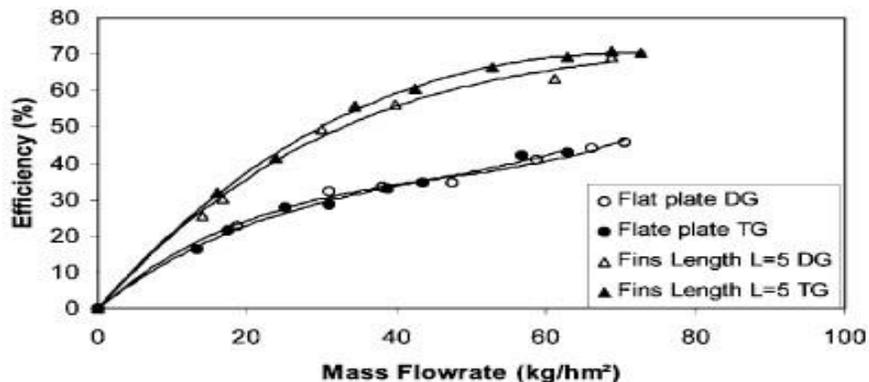


FIGURE 2-16 : EFFICACITE (%) EN FONCTION DU DEBIT MASSIQUE G (KG / HM 2), AVEC AILETTES DE LONGUEUR L = 5 CM

T. Koyuncu 2006 [18], a étudié expérimentalement six différents types de capteurs solaires plans, pour voir l'influence de passage de l'air, le nombre des vitres, et la forme de l'absorbeur sur leur efficacité. Les modèles des capteurs étudiés sont:

Modèle -1 : à simple vitrage en plastique, l'absorbeur est une plaque plane dure à peinture noire, d'avant passe.

Modèle -2 : à simple vitrage en plastique, l'absorbeur est en tôle d'aluminium peinte en noire, d'avant passe.

Modèle -3 : une seule vitre en plastique, l'absorbeur est une plaque plane en forme de zigzag, avec peinture noire, d'avant passe.

Modèle -4 : à simple vitrage en plastique, l'absorbeur est une plaque plane peinte en noire, d'arrière passe.

Modèle -5 : à simple vitrage en plastique, l'absorbeur est une plaque en forme de zigzag à peinture noire, d'arrière passe.

Modèle -6 : double vitre en plastique, l'absorbeur est une plaque plane peinte en noire, d'arrière passe.

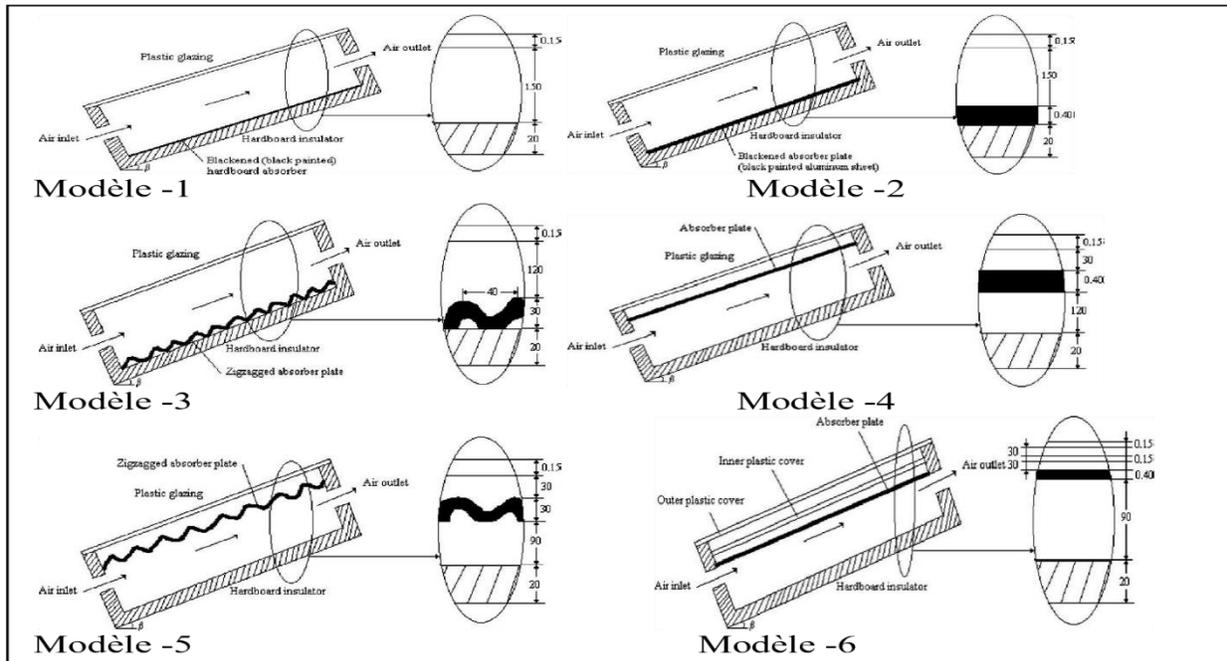


FIGURE 2-17: SCHEMATIQUE DES SIX MODELES DIFFERENTS DE CAPTEURS SOLAIRES A AIR.

Les résultats de cette étude ont montré que le capteur du modèle 1 (vitre en plastique, l'absorbant noir et plat, d'avant passe) est le plus efficace, et celui du modèle 6 est le moins efficace. Alors il a conclu que le nombre de vitres et la méthode de passage de l'air influent considérablement sur l'efficacité du capteur, par contre l'influence de la forme de la surface absorbante est moins.

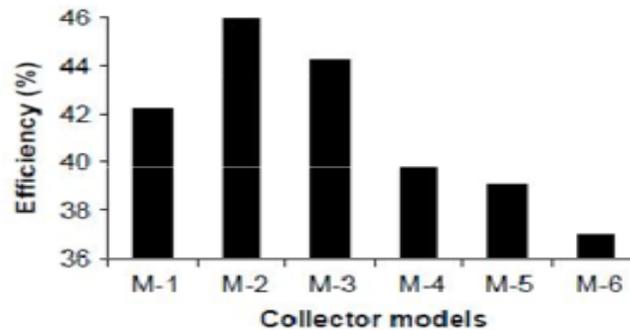


FIGURE 2-18: COMPARAISON DES RENDEMENTS THERMIQUES DES MODELES DE CAPTEURS ETUDIES

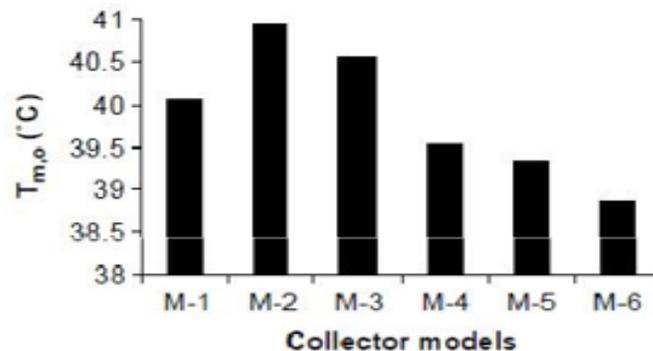


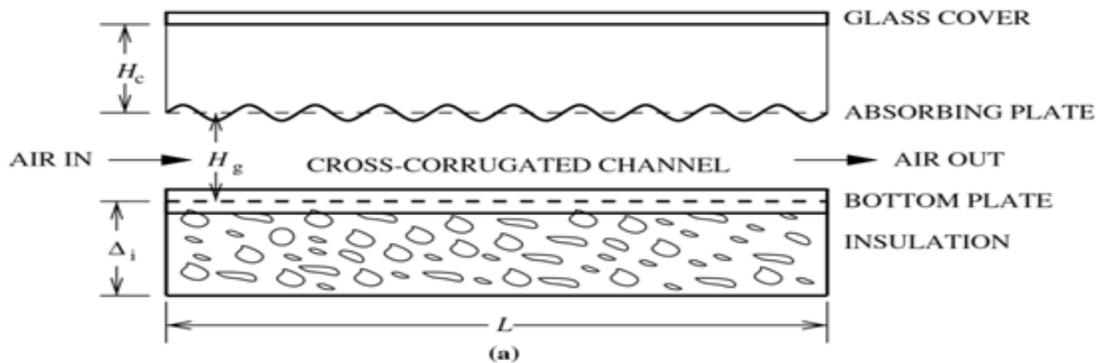
FIGURE 2-19: COMPARAISON DES TEMPERATURES MOYENNES DE SORTIES DE L'AIR DES MODELES DE CAPTEURS ETUDIES

Gao et al 2007 [19] ont analysé l'amélioration des performances d'un capteur solaire avec une plaque absorbante ondulé-croisé qui renforce la turbulence et le transfert de chaleur à l'intérieur du canal et le taux d'écoulement du fluide. L'analyse a été faite sur deux types d'appareils de chauffage sont considérés dans ce travail. Les deux types sont constitués d'une seule plaque de verre plate, d'une

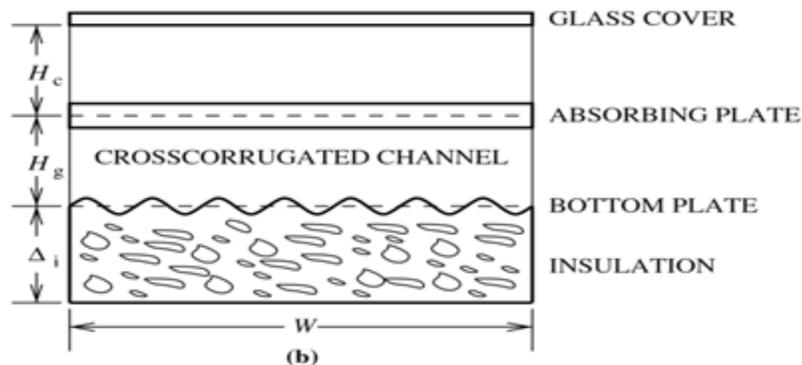
plaque absorbante en forme de vague et d'une plaque inférieure en forme de vague, qui est fixée à l'isolation arrière du dessous. Le canal formé par la plaque absorbante et la plaque inférieure est le canal d'écoulement d'air où l'air est chauffé par le rayonnement solaire absorbé sur la plaque absorbante.

Dans le réchauffeur de type 1, tel qu'illustré sur la figure 2-17, la forme ondulée de la plaque absorbante est dans la direction d'écoulement d'air et celle de la plaque inférieure est perpendiculaire à la direction d'écoulement d'air.

Dans le réchauffeur de type 2, cependant, c'est la forme ondulée de la plaque de fond qui est dans la direction de l'écoulement d'air et la plaque d'absorption est perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Ils sont également analysé un réchauffeur d'air solaire à plaque plate (appelé réchauffeur de type 3) qui comporte à la fois une plaque absorbante plate et une plaque inférieure plate.



(A) VUE EN COUPE PERPENDICULAIRE A LA DIRECTION DE L'ECOULEMENT



B) VUE EN COUPE LE LONG DE LA DIRECTION D'ECOULEMENT

FIGURE 2-20 : DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE L'AEROTHERME SOLAIRE

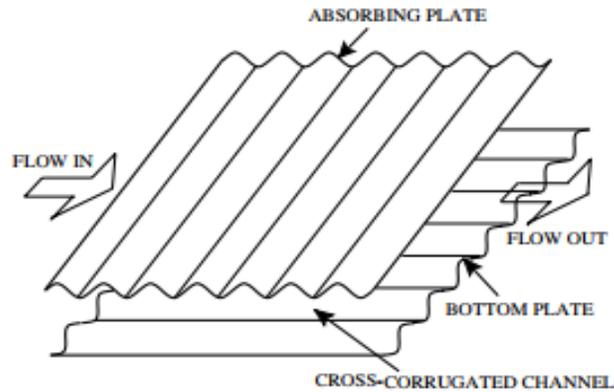


FIGURE 2-21 : DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE LA PLAQUE D'ABSORPTION ONDULEE CROISEE ET DE LA PLAQUE INFERIEURE.

Les résultats sont présentés sous forme des graphes suivants :

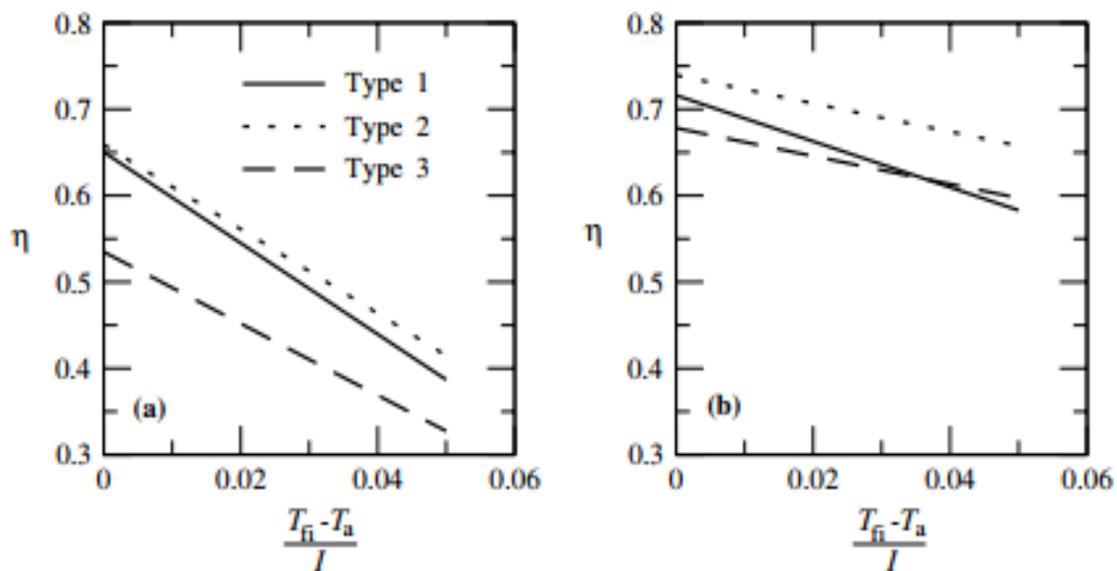


FIGURE 2-22 : SOLUTIONS ANALYTIQUES DES EFFICACITES RELEVES (TFI-TA) CAS (A) AUCUN REVETEMENT SELECTIONNE SUR AUCUNE SURFACE ;CAS (B) SEULE LA PLAQUE ABSORBANTE A UN REVETEMENT SELECTIONNE.

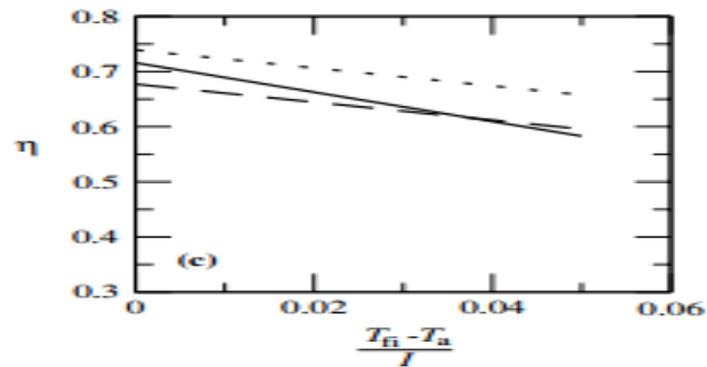


FIGURE 2-23: SOLUTIONS ANALYTIQUES DES EFFICACITES RELEVÉES $(T_{fi}-T_a)/I$ / CAS (C)
REVETEMENTS SELECTIONNES SUR LES PLAQUES ABSORBANTES ET DE FOND.

K. Aoues et Al 2008 [20] ont mené un travail théorique en vue d'améliorer le coefficient de transfert convectif entre l'air et l'absorbeur, en plaçant des chicanes cylindriques perpendiculairement à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant figure 2-21

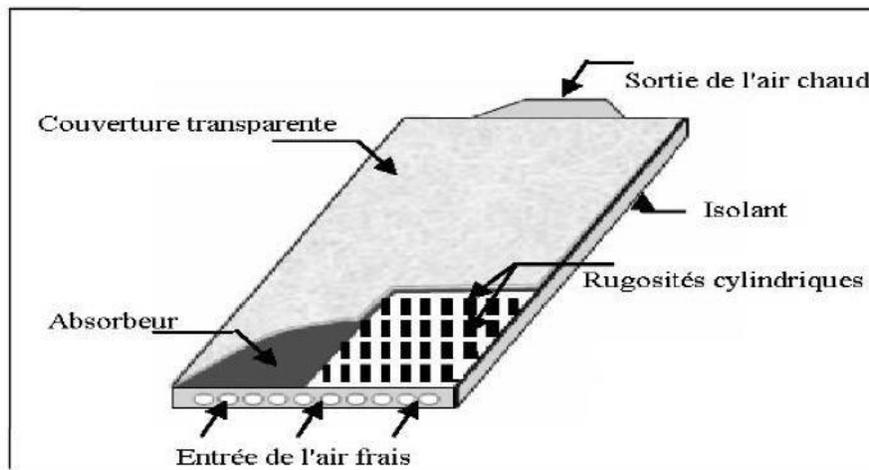


FIGURE 2-24 : CAPTEUR PLAN A AIR MUNI DE RUGOSITES CYLINDRIQUES

Les auteurs ont étudié les trois cas suivants figure :

- Le capteur plan à air dépourvu de chicanes.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en rangés alignées.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en quinconces.

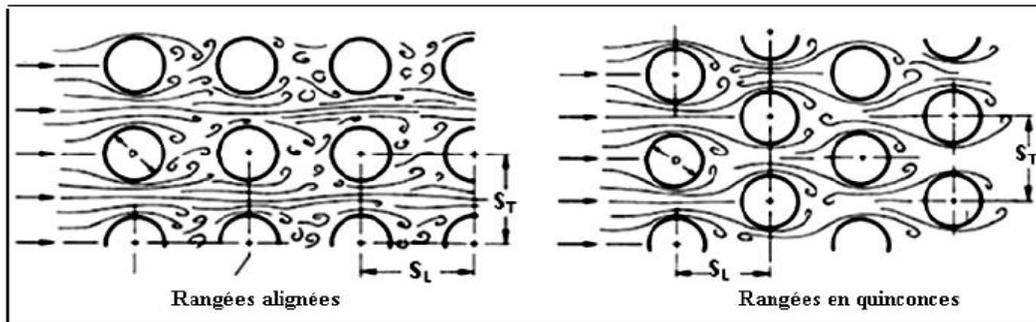


FIGURE 2-25 : LES DIFFERENTS ARRANGEMENTS DES CHICANES CYLINDRIQUES

Les auteurs ont trouvé que le meilleur rendement est obtenu avec des chicanes cylindriques arrangées en quinconce, et le plus bas pour le capteur lisse.

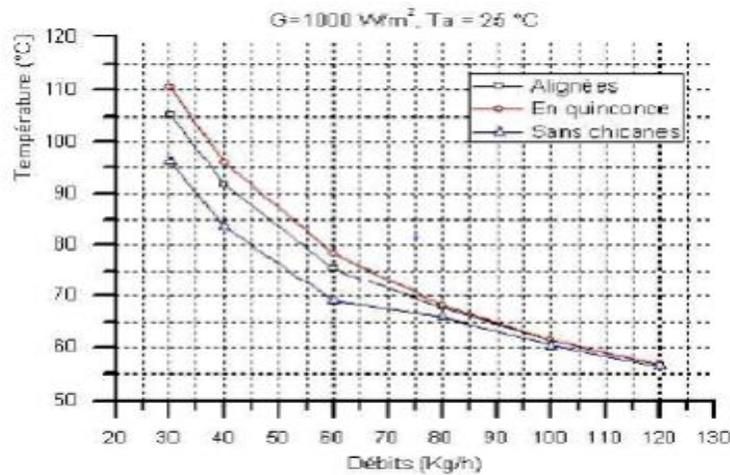


FIGURE 2-26 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU DEBIT

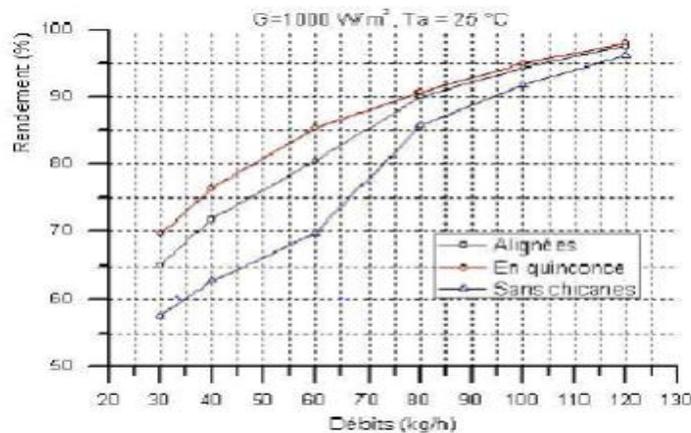


FIGURE 2-27 : EVOLUTION DU RENDEMENT EN FONCTION DU DEBIT

F. Benyelles et al. 2007 [21] ont proposé de placer un isolant « aérogel des ilice » au-dessus de l'absorbeur. C'est un matériau de faible conductivité thermique et de forte porosité.

Les auteurs ont choisi l'aérogel de silice pour ses propriétés. C'est un matériau solide à basse densité variant de 80 à 270 kg/m³, transparent, poreux (porosité de 35% à 90%). Son indice de réfraction est compris entre 1.2 à 1.05. Pour une épaisseur de l'ordre de 20 mm, la transmittance solaire normale est de 90%. Sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02 W/mK.

Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif.

Capteur simple vitrage à absorbeur sélectif.

Capteur double vitrage à absorbeur non sélectif

Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif muni d'un isolant à aérogel de silice.

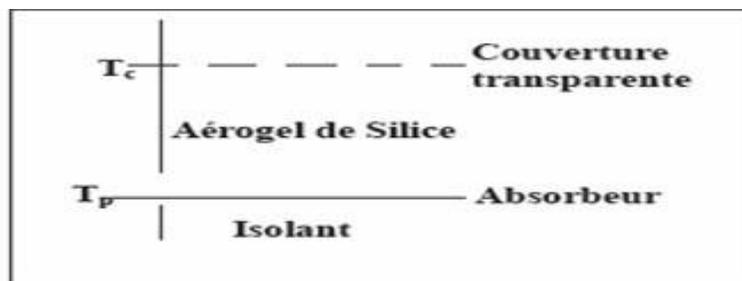


FIGURE 2-28 : CONCEPTION DES CAPTEURS A AEROGEL DE SILICE

Les auteurs ont trouvé que la température de la vitre d'un capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif peut atteindre 50°C, alors qu'elle n'atteint que 20 °C pour un absorbeur muni d'un isolant aérogel de silice. En outre, le coefficient de pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, dans ce cas est minime. Ils ont déduit que l'aérogel de silice est un super isolant transparent de la face avant du capteur, et contribue ainsi à l'amélioration du rendement du capteur solaire.

Dans une autre étude sur l'amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire à air, réaliser par **Aoues, Moumimi et al 2009 [22]**, ont introduit dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude.
- Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur.

Le dispositif expérimental est illustré par la figure 2-29

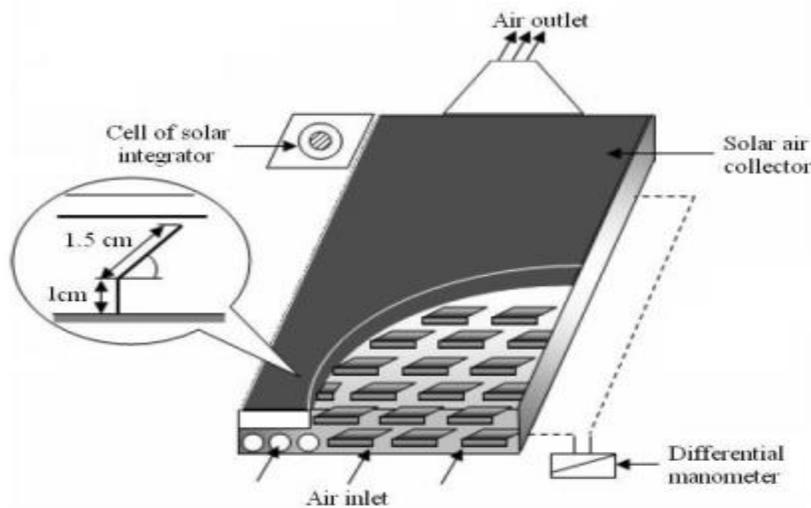


FIGURE 2-29 : SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La veine d’air dynamique du capteur est de 25mm de hauteur, comprise entre la plaque absorbante et une plaque en acier galvanisé placée sur l’isolant, cette veine est équipée de rangées d’obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l’écoulement de l’air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d’angle α respectivement égale à 60° et 120° . Ces chicanes sont espacées d’une distance respectivement à $d=10\text{cm}$ et $d=5\text{cm}$ suivant deux configuration A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes figure 2-30.

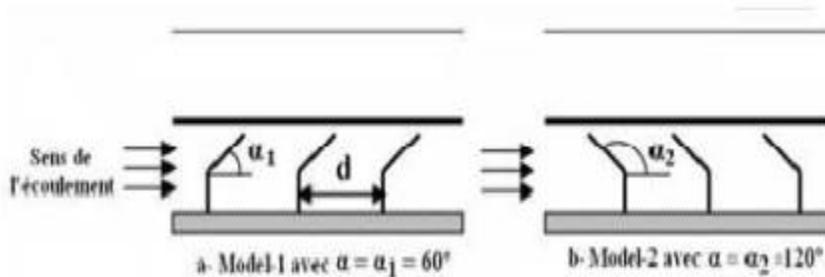


FIGURE 2-30 : SCHEMA DESCRIPTIF DES CHICANES

Après une série de tests expérimentaux, les auteurs ont conclu que la géométrie de passage dans la section droite perpendiculaire à l'écoulement joue un rôle important et ont trouvé que les chicane modèle 1 ($\alpha = 60^\circ$) placées dans les configurations A1, B1 donnent les meilleurs résultats par rapport à ceux des configurations A2, B2 qui sont des chicanes modèles 2 ($\alpha = 120^\circ$).

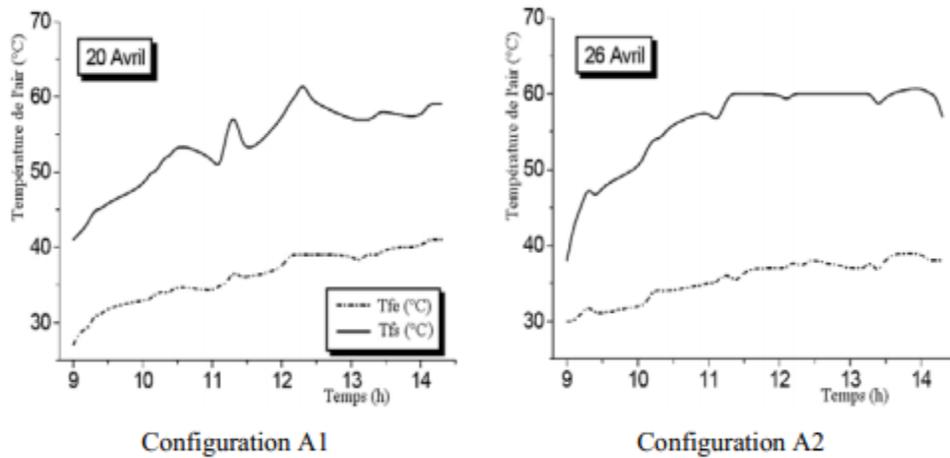


FIGURE 2-31 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU CAPTEUR EN FONCTION DU TEMPS

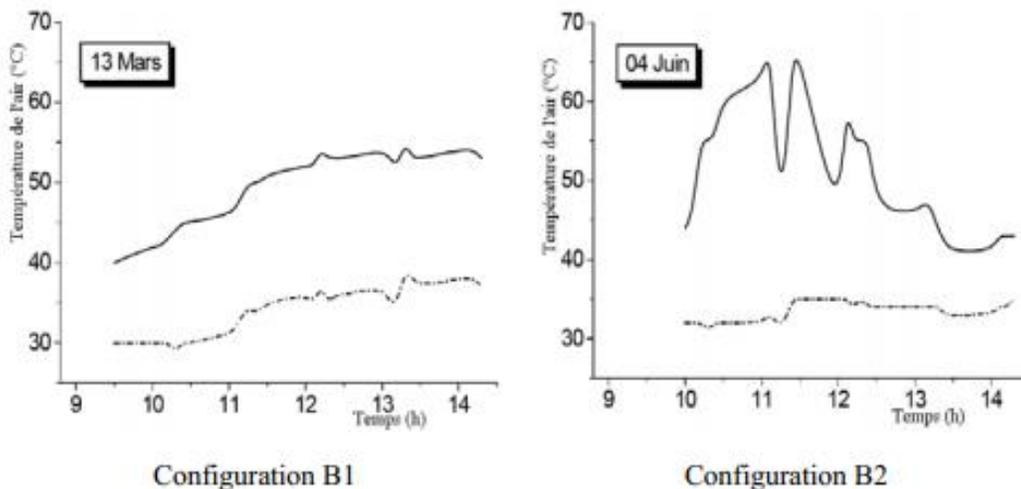


FIGURE 2-32: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU CAPTEUR EN FONCTION DU TEMPS

TABLEAU 2-2 : DONNEES EXPERIMENTALES ET RESULTATS DES CALCULS

Conf.	Temps (h)	I_G (W/m ²)	T_a (°C)	T_{fe} (°C)	T_{fs} (°C)	$\frac{(T_{fe} - T_{fs})}{I_G}$	η (%)
A1	11h40	738	28	36	55	0.0108	56.06
A2	10h30	746	24.5	34	54	0.0127	55.67
B2	11h30	743	23	34e	50	0.0148	55.11
B1	11h50	739	31	35	66	0.0054	57.80

2-3 CONCLUSION

A travers cette étude bibliographique concernant les capteurs solaires plans, nous avons pu constater que les performances d'un capteur solaire dépendent en grande partie de la qualité d'absorption et de transmission de chaleur de la plaque absorbante ainsi, plusieurs recherches ont été lancées pour proposer de nouvelles dispositions des plaques absorbantes afin d'augmenter les performances des capteurs solaires.

CHAPITRE 3

MODELISATION THERMIQUE

D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

CHAPITRE 3 : MODELISATION THERMIQUE D'UN CAPTEUR**SOLAIRE PLAN****3-1 INTRODUCTION**

La production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire est aujourd'hui une des techniques les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiale. Actuellement il y a plusieurs millions de m² des capteurs et de systèmes solaires installés dans le monde utilisant les technologies les plus récentes.

Dans ce travail, nous allons étudier les performances thermiques du capteur solaire plan à eau en utilisant un programme de simulation destiné pour le calcul des différents paramètres qui entrent dans le perfectionnement du capteur solaire, réalisé sous MATLAB. Il est exploité aussi pour l'étude de l'influence de quelques paramètres sur le fonctionnement général du capteur étudié.

L'originalité du capteur plan réalisé, réside dans le fait qu'il est muni d'un collecteur du type échelle figure 3-1.

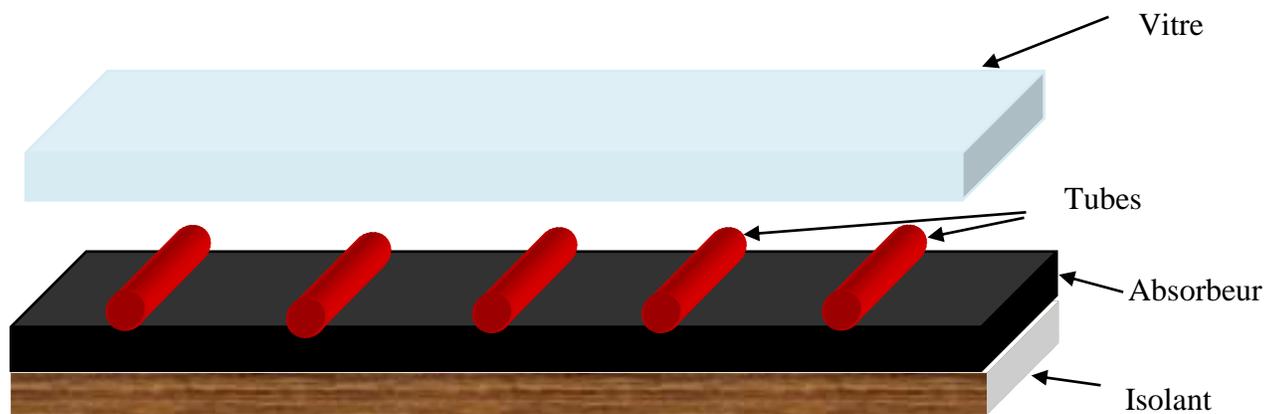


FIGURE 3-1 : SCHEMAT DU CAPTEUR SOLAIRE ETUDIER

Les caractéristiques du capteur sont données en Table 3-1 :

TABLE 3-1 : Caractéristiques du capteur

Dimensions	Longueur = 2 m, Largeur = 0,8 m
Vitrage (vitre ordinaire)[5]	$\rho_v = 2700 [kg / m^3]$, $Cp_v = 840 [j / (kg.K)]$, $\lambda_v = 0,78 [w / (m^{\circ}C)]$ $\varepsilon_v = 0,9$, épaisseur = $3.10^{-3} [m]$
Absorbeur[5] et tube (Aluminium en peinture noir)	$\rho_v = 2740 [kg / m^3]$, $Cp_v = 896 [j / (kg.K)]$, $\lambda_v = 205 [w / (m^{\circ}C)]$ $\varepsilon_v = 0,96$, Diamètre = $3.10^{-3} [m]$, épaisseur = $0,5.10^{-3} [m]$
Isolation [5] (Polystyrène)	$\rho_v = 16 [kg / m^3]$, $Cp_v = 1670 [j / (kg.K)]$, $\lambda_v = 0,042 [w / (m^{\circ}C)]$ $\varepsilon_v = 0,1$, épaisseur = $5.10^{-2} [m]$

3-2 GRANDEURS GEOGRAPHIQUES ET ASTRONOMIQUES POUR LE GISEMENT SOLAIRE

3-2.1 Grandeurs pour le repérage du soleil

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison. Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre sur elle-même (autour de son axe), et de son mouvement autour du soleil (dans son orbite) [23,24].

Afin de déterminer cette position il est d'usage d'utiliser deux repères : le repère équatorial ou horaire et le repère horizontal ou azimutal.

3-2.1.1 Repère de coordonnées équatoriales

Dans ce repère la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs [23,24]:

➤ La déclinaison (δ)

C'est l'angle entre la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. Elle est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices, elle varie de $-23,27^{\circ}$ au solstice d'hiver à $+23,27^{\circ}$ au solstice d'été.

Elle peut être évaluée en première approximation par la relation suivante [25] :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(j + 284)\right) \quad (3-1)$$

δ est exprimée en degrés.

j est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

➤ **Angle horaire (ω)**

C'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante [26] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (3-2)$$

TSV : temps solaire vrai ;

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

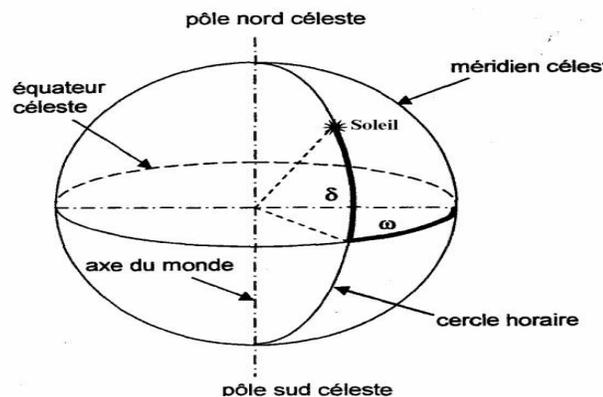


FIGURE 3-2: LES COORDONNEES HORAIREES [27]

3-2.1.2 **Repère de coordonnées horizontales**

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu [23].

➤ **Hauteur du soleil (h)**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est donné par la relation suivante [27]:

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (3-3)$$

où δ est la déclinaison, ω est l'angle horaire

➤ **Azimut du soleil (a)**

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

Il est donné par la relation suivante [28] :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (3-4)$$

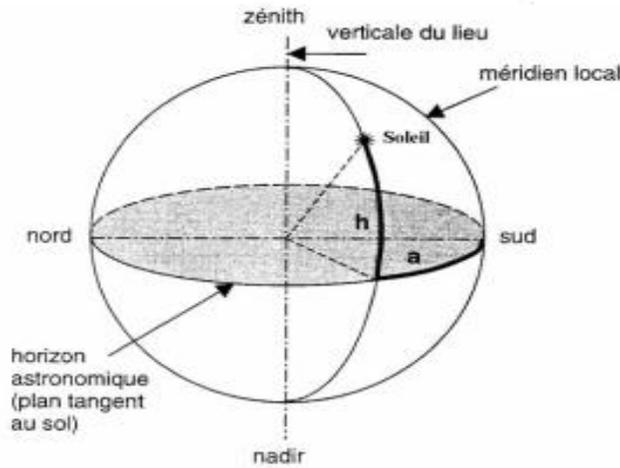


FIGURE 3-3 : COORDONNEES HORIZONTALES DU SOLEIL [27].

3-2.2 **Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre**

Tout point à la surface de la terre est localisé par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir la latitude φ (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud) et la longitude L (positive à l'ouest, négative à l'est). Figure3-3[27,29] :

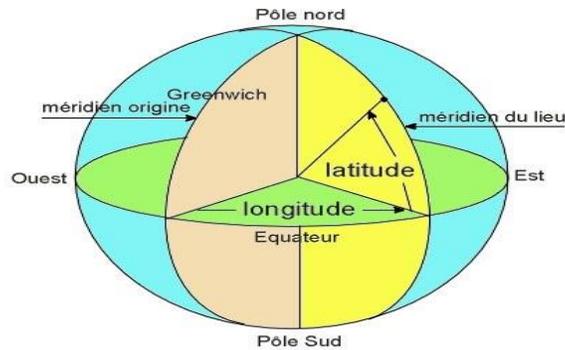


FIGURE 3-4 : DEFINITION DES COORDONNEES TERRESTRE D'UN LIEU DONNE [5]

➤ **Longitude du lieu : L**

C'est l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu et le plan méridien origine (Greenwich 0°).

➤ **Latitude du lieu : φ**

C'est l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu et le plan équatorial. Elle varie de -90° au pôle Sud à $+90^\circ$ au pôle Nord

$\varphi < 0$ L'hémisphère Sud

$\varphi > 0$ L'hémisphère Nord

$\varphi = 0$ Sur le plan de l'équateur

L'altitude Z correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence (surface de la mer).

3-3 ESTIMATION PRATIQUE DES FLUX DIRECT, DIFFUS ET GLOBAL:

3-3.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. En dehors de l'atmosphère terrestre [30].

3-3.2 Constante solaire

La constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité, située à la limite de l'atmosphère. Dans notre cas, la valeur a été retenue en 1980 est : $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ [3].

I_0 est variable au cours de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable (Trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par [9] :

$$C = 1 + 0,034 \cos\left(\frac{360}{365}(j-2)\right) \quad (3-5)$$

Le constant solaire corrigé est [9] :

$$I = I_0 C$$

3-3.3 Rayonnement direct

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire sans aucun intermédiaire [31,32].

L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire.

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par [33]:

$$\tau_{dir} = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)}\right) \quad (3-6)$$

Où:

a , b coefficient de trouble du ciel.

h : hauteur du soleil.

Tableau 3-2: Coefficient de trouble de ciel

Coefficients de Trouble	Conditions Normales	Ciel pur	Zone industrielle
a	0,88	0,87	0,91
b	0,26	0,17	0,43

- Le rayonnement solaire direct mesuré sur un plan horizontal est donné par la relation suivante [33]:

$$I_{dirh} = I \tau_{dir} \sin(h) \quad (3-7)$$

3-3.4 Rayonnement diffus

Est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée, il se compose en deux composantes [34].

➤ Rayonnement diffus par ciel

L'irradiation diffuse provenant de la voûte céleste reçue sur un plan horizontal s'écrit suivant la formule suivante [35] :

$$I_{difc} = I \sin(h) \left[0,2710 - 0,2939 \cdot \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)}\right) \right] \quad (3-8)$$

➤ Rayonnement diffusé par le sol

L'expression du rayonnement solaire diffus du sol est donnée comme suit [35]:

$$I_{difs} = (I_{dir} + I_{difc}) \cdot alb \quad (3-9)$$

alb : albédo du sol, est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente[1].

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

3-3.5 Rayonnement global

Est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure 3-4 illustre les différents composants du rayonnement solaire.

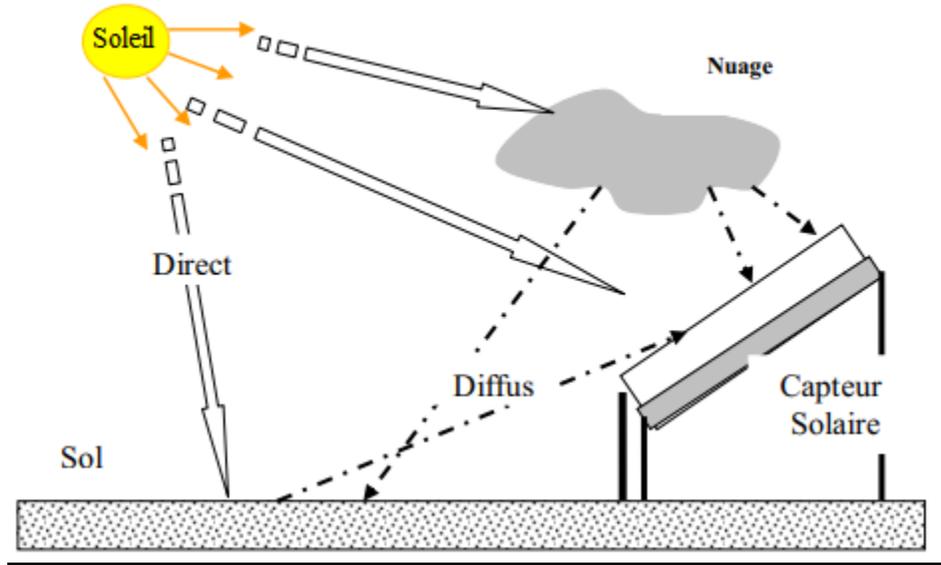


FIGURE 3-5 : RAYONNEMENT DIRECT, DIFFUS ET GLOBAL [36]

L'expression du rayonnement solaire reçu par une surface S d'orientation quelconque, α par rapport au sud et d'inclinaison β par rapport à l'horizontale fait intervenir les facteurs de correction suivants [25]:

$$R_s = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad R_b = \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} \quad R_c = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (3-10)$$

β : angle d'inclinaison du capteur.

θ : angle d'incidence des rayons solaires pour une orientation sud [37].

$$\cos(\theta) = \cos(h) \cos(\beta) + \sin(h) \sin(\beta) \cos(a - \gamma) \quad (3-11)$$

γ : la déviation de la projection sur un plan horizontal de la normal à la surface à partir du méridien local, avec zéro plein sud, négatif est et positif ouest.

a : azimut solaire.

Donc on peut exprimer le rayonnement global incident sur une surface inclinée par [26]:

$$I_t = I_{dirh} \cdot R_b + I_{dijc} \cdot R_c + I_{difs} \cdot R_s \quad (3-12)$$

3-4 METHODE DE DESCRIPTISATION

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret s'appuie sur les méthodes classiques d'analyse numérique. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discrète, la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis.

3-4.1 Differences finies

Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points sur lesquels on approche les opérateurs de dérivation des équations modèles par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie [12].

3-4.2 Elements finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chacun de ces domaines, appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible. Ces éléments, triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes, doivent réaliser une partition du domaine d'étude (ils sont disjoints et leur union recouvre le domaine tout entier). Cette partition qui est généralement appelée découpage ou discrétisation du domaine doit respecter un certain nombre de règles qui permettent d'assurer un bon déroulement du calcul [12].

3-4.3 Volumes finis

La méthode des volumes finis est utilisée par la majorité des codes de calcul, elle se base sur la subdivision du domaine d'étude en un nombre fini de volumes de contrôle (maillage) sur lesquels les équations de conservation sont intégrées. En plus de ça la méthode des volumes finis consiste à [14]:

- L'intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire des équations algébriques pour les variables dépendantes discrètes (les inconnues), telles que les vitesses, pression, températures et les autres scalaires conservés.
- La linéarisation des équations discrétisées.
- La résolution du système d'équations linéaires résultantes. .

3-4.4 Methodes spectrales

L'inconnue est approchée par des séries Fourier tronquées ou par des séries de polynômes Tchebychev. Par rapport aux méthodes des différences finies et des éléments finis.

L'approximation n'est pas locale mais elle est valide sur tout le domaine de calcul. On utilise également le concept du résidu pondéré comme dans la méthode des éléments finis où en imposant que l'approximation doive correspondre à la solution exacte pour les points du maillage [38].

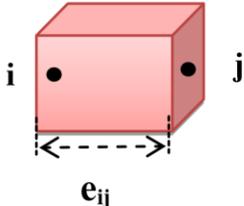
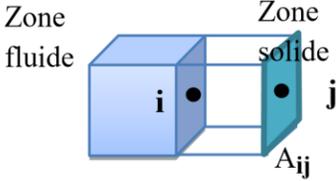
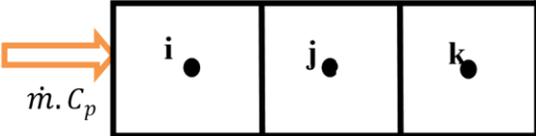
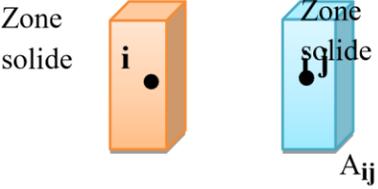
3-5 METHODE NODALE

La modélisation est basée sur l'utilisation de la méthode nodale [39,40].

La démarche consiste à découper le système en un certain nombre de volumes élémentaires supposés isothermes.

Les échanges de flux entre les nœuds des systèmes discrets s'effectuent à travers des composants représentés par des connexions thermiques : conductance thermique, sources de chaleur et température imposée.

TABLEAU 3-3 : EXPRESSION DES DIFFERENTS FLUX ET CONDUCTANCES [6]

Expression des conductances et des flux	Schémas
<p style="text-align: center;">conduction</p> $G_{ij} = \frac{\lambda_{ij} \cdot A_{ij}}{e_{ij}}$ $\Phi = G_{ij} \cdot (T_i - T_j)$	
<p>Convection</p> $G_{ij} = h_{ij} \cdot A_{ij}$ $\Phi = G_{ij} \cdot (T_i - T_j)$	
<p>Écoulement fluide</p> $G_{ij} = \dot{m} \cdot C_p$ $\Phi = G_{ij} \cdot (T_i - T_j)$	
<p>Rayonnement</p> $G_{ij} = h_{ij} \cdot A_{ij}$ $\Phi = G_{ij} \cdot (T_i - T_j)$	

G_{ij} : La conductance thermique.

Φ_{ij} : Le flux de chaleur.

h_{ij} : Coefficient d'échange thermique.

A_{ij} : Surface d'échange thermique.

λ_{ij} : Conductivité thermique des substances.

e_{ij} : Épaisseur de la substance

T_i et T_j : Les températures dans les nœuds **i** et **j**.

3-6 HYPOTHESES SYMPLIFICATIVES

- La température de la vitre et de l'absorbeur sont considérées uniformes.
- L'écoulement est monodimensionnel.
- La conduction au niveau de la vitre est négligeable.
- Coefficients d'échange convectif de la lame d'air-absorbeur et de la lame d'air -vitre sont égaux.
- Les caractéristiques des matériaux sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques
- Le ciel peut être assimilé à un corps noir de température équivalente calculée.
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.

3-7 MODELISATION DE LA TEMPERATURE AMBIANTE

La température ambiante est modélisée par la formule suivante [41]

$$T_{amb} = \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) \sin \left(\frac{(TSV - 8)180}{12} \right) + \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad (3-13)$$

TSV le temps solaire vrais en heures.

3-8 BILAN THERMIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN A EAU

Nous allons établir un modèle thermique pour prédire le comportement énergétique réel de notre capteur, on approche son fonctionnement par l'application de la méthode nodale. Il s'agit au fait, de discrétiser le capteur en quatre nœuds et d'établir les équations générales de ces nœuds en régime instationnaire, en donnant le bilan thermique de chaque nœud.

A cet effet nous allons faire un bilan énergétique sur chaque constituant du capteur étudié à partir du premier principe de la thermodynamique.

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \sum \dot{Q} + \sum \dot{w} \quad (3-14)$$

Au niveau du vitrage

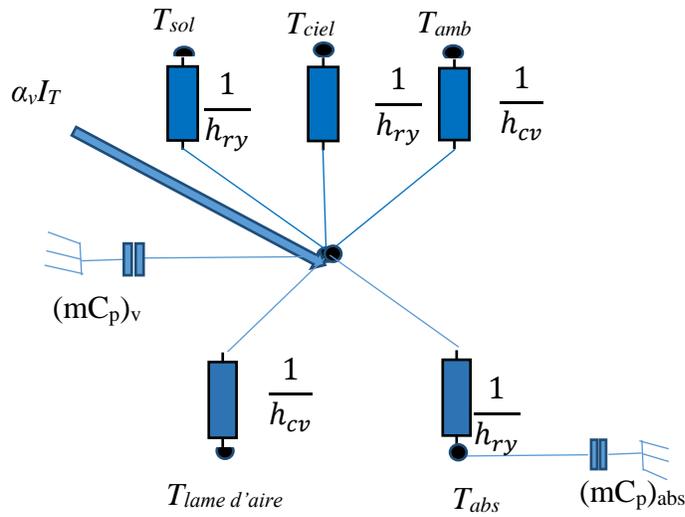


FIGURE 3-6 : SCHEMA THERMOELECTRIQUE QUI REPRESENTE LES ECHANGES THERMIQUES AVEC LE VITRE

$$\rho_v v_v C_{p-v} \frac{\partial T_v}{\partial t} = I_t \alpha_v S_v + h_{ry_v_ciel} S_v (T_{ciel} - T_v) + h_{ry_v_sol} S_v (T_{sol} - T_v) + h_{cv_v_amb} S_v (T_{amb} - T_v) + h_{ry_v_abs} S_v (T_{abs} - T_v) + h_{cv_v_air} S_v (T_{air} - T_v) \quad (3-15)$$

➤ Pour la lame d'air

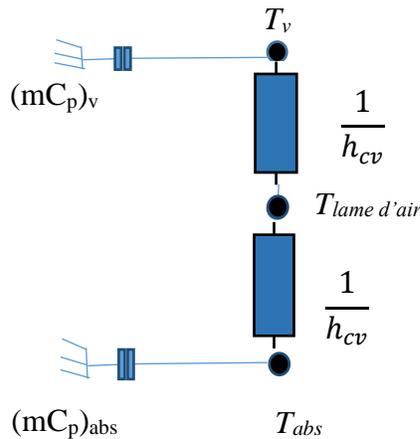


FIGURE 3-7 : SCHEMA THERMOELECTRIQUE QUI REPRESENTE LES ECHANGES THERMIQUES AVEC LA LAME D'AIR

$$\rho_{air} v_{air} C_{p-air} \frac{\partial T_{air}}{\partial t} = h_{cv_v_air} S_v (T_v - T_{air}) + h_{cv_abs_air} S_{abs} (T_{abs} - T_{air}) \quad (3-16)$$

➤ Pour le fluide caloporteur l'eau

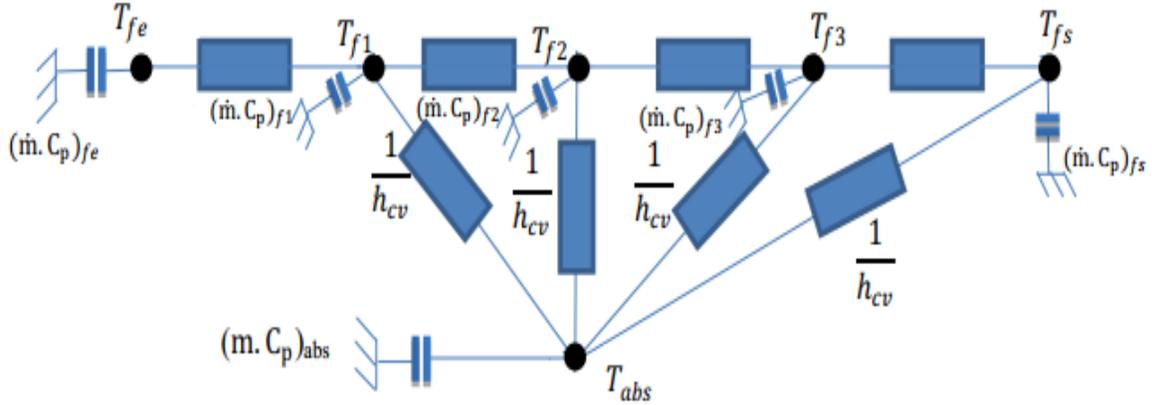


FIGURE 3-8 : SCHEMA THERMOELECTRIQUE REPRESENTANT LES ECHANGES THERMIQUES AVEC LE FLUIDE CALOPORTEUR

Nœud 1

$$\rho_f \nu_f C_{p-f} \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} = h_{cv_abs_f1} \frac{S_t}{4} (T_{abs} - T_{f1}) + \rho_f \nu_{f1} C_{p_{f1}} (T_{fe} - T_{f1}) \quad (3-17)$$

Nœud 2

$$\rho_f \nu_f C_{p-f} \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} = h_{cv_abs_f2} \frac{S_t}{4} (T_{abs} - T_{f2}) + \rho_{f2} \nu_{f2} C_{p_{f2}} (T_{f1} - T_{f2}) \quad (3-18)$$

Nœud 3

$$\rho_f \nu_f C_{p-f} \frac{\partial T_{f3}}{\partial t} = h_{cv_abs_f3} \frac{S_t}{4} (T_{abs} - T_{f3}) + \rho_{f3} \nu_{f3} C_{p_{f3}} (T_{f2} - T_{f3}) \quad (3-19)$$

Nœud

$$\rho_f \nu_f C_{p-f} \frac{\partial T_{f4}}{\partial t} = h_{cv_abs_f4} \frac{S_t}{4} (T_{abs} - T_{f4}) + \rho_{f4} \nu_{f4} C_{p_{f4}} (T_{f3} - T_{f4}) \quad (3-20)$$

➤ Au niveau de l'absorbeur :

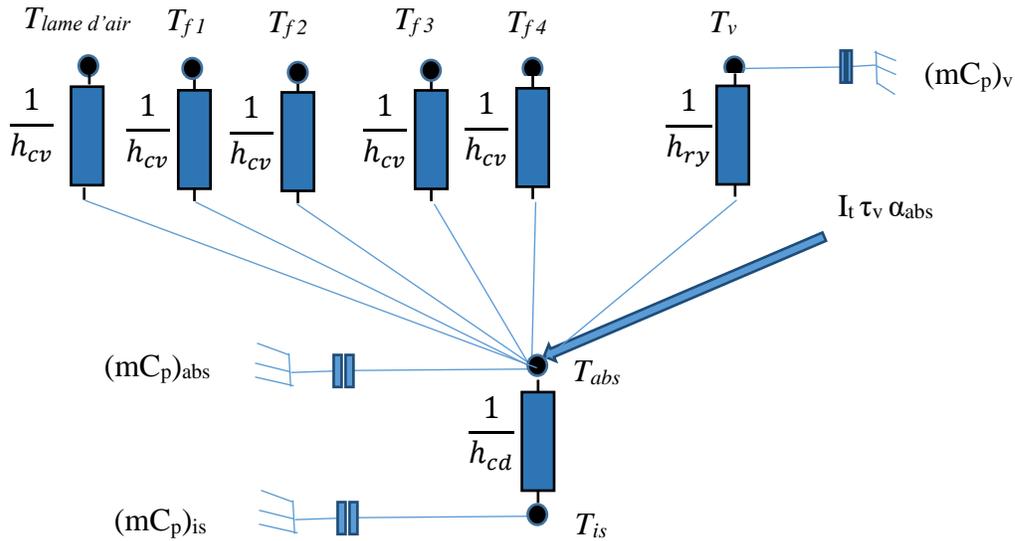


FIGURE 3-9 : SCHEMA THERMOELECTRIQUE REPRESENTANT LES ECHANGES THERMIQUES AVEC L'ABSORBEUR

$$\rho_{abs} v_{abs} C_{p-abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} = I_t \alpha_{abs} \tau_v S_{abs} + h_{ry-abs-v} S_{abs} (T_v - T_{abs}) + h_{cv-abs-f} \frac{S_t}{4} (T_{f1} - T_{abs}) + h_{cv-abs-f} \frac{S_t}{4} (T_{f2} - T_{abs}) + h_{cv-abs-f} \frac{S_t}{4} (T_{f3} - T_{abs}) + h_{cv-abs-f} \frac{S_t}{4} (T_{f4} - T_{abs}) + h_{cd-abs-is} S_{abs} (T_{is} - T_{abs}) \quad (3-21)$$

➤ Au niveau de l'isolant :

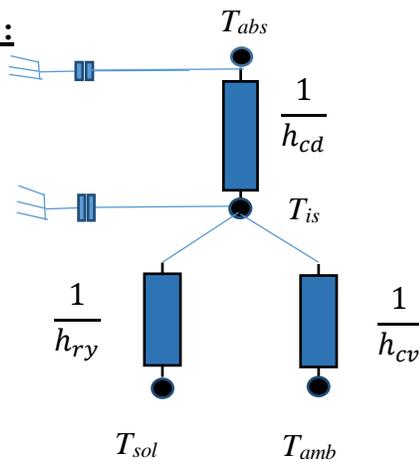


FIGURE 3-10 : SCHEMA THERMOELECTRIQUE QUI REPRESENTE LES DIFFERENTS ECHANGES THERMIQUES AVEC L'ISOLANT

$$\rho_{is} \nu_{is} C_{p-is} \frac{\partial T_{is}}{\partial t} = h_{cd-is-abs} S_{is} (T_{abs} - T_{is}) + h_{ry-is-sol} S_{is} (T_{sol} - T_{is}) + h_{cv-is-amb} S_{is} (T_{amb} - T_{is}) \quad (3-22)$$

3-9 MODELISATION DES COEFFICIENT D'ECHANGE THERMIQUE

Echange thermique par rayonnement :

➤ **Entre la vitre et ciel [42]:**

$$h_{ry-v-ciel} = \sigma \varepsilon_v \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) (T_v + T_{ciel}) (T_v^2 + T_{ciel}^2) \quad (3-23)$$

T_c : Température équivalente du ciel donnée par la relation de Swinbank (1963) :

$$T_{ciel} = 0,0552 T_{amb}^{3/2} \quad (3-24)$$

➤ **Entre la vitre et l'absorbeur [43]:**

$$h_{ry-v-abs} = \frac{\sigma (T_v + T_{abs}) (T_v^2 + T_{abs}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{abs}} - 1} \quad (3-25)$$

➤ **Entre l'isolant et le sol [43] :**

$$h_{ry-is-sol} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_{is} (1 + \cos(\pi - \beta)) (T_{is} + T_{sol}) (T_{is}^2 + T_{sol}^2) \quad (3-26)$$

➤ **Entre la vitre et le sol [44] :**

$$h_{ry-v-sol} = \sigma \varepsilon_v \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (T_v + T_{sol}) (T_v^2 + T_{sol}^2) \quad (3-27)$$

Echange thermique par conduction :

Les coefficients de transfert de chaleur par conduction à travers l'isolant du capteur seront donnés par:

$$h_{cd_is_abs} = \frac{e_{is}}{\lambda_{is}}$$

Echange thermique par convection :

C'est la relation développée par Mc. Adams *et al.*, qui est retenue pour le calcul de l'échange thermique par convection dû au vent, celle-ci intervient dans le transfert à l'avant et à l'arrière du capteur.

$$h_{cv_v_amb} = 5,67 + 3,86 V_v$$

V_v ; est la vitesse du vent exprimée en m/s

➤ **Coefficient de transfert par convection entre l'absorbeur et le caloporteur**

Pour déterminer le coefficient d'échange thermique convectif interne, $h_{cv_f_i}$ dans le cas des conduites, on utilise les corrélations de Sieder Tate et Hausen. Avec i indice du milieu

Elles dépendent du régime d'écoulement, caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds.

Introduisons le nombre adimensionnel de Graetz, défini par [31]:

$$G_z = R_e P_r \frac{D_h}{L} \quad (3-28)$$

Régime laminaire : $R_e < 2100$

Si : $G_z < 100$

$$N_u = 3,66 + \frac{0,085 G_z}{1 + 0,047 G_z^{2/3}} \quad (3-29)$$

Si : $G_z > 100$

$$N_u = 1,86 G_z^{1/3} + 0,87 \left(1 + 0,015 G_z^{1/3} \right) \quad (3-30)$$

Régime transitoire[19] : $2100 < R_e < 10^4$

$$N_u = 0,116 \left(R_e^{2/3} - 125 \right) \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{2/3} \right] P_r^{1/3} \quad (3-31)$$

Régime turbulent : $R_e > 10^4$

$$N_u = 0,027 R_e^{0,8} P_r^{0,33} \quad (3-32)$$

Avec les nombres de Nusselt, Reynolds et de Prandtl sont définies comme suit:

$$N_u = \frac{h_{cv_f_i} D_h}{\lambda_f}$$

$$R_e = \frac{\rho_f V_f D_h}{\mu_f}$$

Pour déterminer le coefficient d'échange thermique de la lame d'air [28] :

$$h_{lame} = 1,42 \left\{ \frac{(T_p - T_{abs}) \sin(\beta)}{L} \right\}^{1/4} \quad (3-33)$$

3-10 RENDEMENT INSTANTANE DU CAPTEUR

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur (P_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur (P_{ab}). Selon [35], la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané donné par la relation suivante :

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{P_u}{S_c I_t} \quad (3-34)$$

Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par [36]:

$$\eta_i = \frac{\dot{m}_f C_{p-f} (T_{fs} - T_{fe})}{S_c I_t} \quad (3-35)$$

$$P_u = \dot{m}_f C_{p-f} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (3-36)$$

Avec ;

P_{ab} : La puissance solaire arrivant sur le capteur [W/m²].

P_u : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur [W].

S_c : Surface du capteur [m²]

I_t : Flux solaire global incident [W/m²].

\dot{m} : Débit massique du fluide caloporteur [kg/s]

C_{p-f} : Chaleur spécifique du fluide [j/(kg.K)] .

T_{fs} : Température de sortie du fluide [°C].

T_{fe} : Température d'entrée du fluide [°C].

3-11 PERTES DE CHARGE

Les pertes de charges linéaires sont dues aux frottements entre le fluide et la paroi interne de la tuyauterie. Elles sont évaluées par la relation de Darcy-Weisbach [9] :

$$\text{Avec :} \quad \delta P_L = \frac{1}{2} \lambda \rho_f \frac{L}{D} V^2 \quad (3-37)$$

δP_L : Pertes de charges linéaires exprimées en pascal (Pa).

L : Longueur de la conduite (m).

V : La vitesse moyenne du fluide dans la conduite (m/s).

D : Diamètre de la conduite (m).

λ : Coefficient adimensionnel de perte de charge, c'est une fonction du nombre de Reynolds.

Régime laminaire : $R_e < 2100$

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad (3-38)$$

Régime transitoire : $2100 < R_e < 10^4$

$$\lambda = \frac{0,316}{R_e^{0,25}} \quad (3-39)$$

Régime turbulence $R_e > 10^4$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,81 \log_{10} \left[\left[\frac{6,9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon}{D 3,7} \right)^{1,11} \right] \right] \quad (3-40)$$

3-12 METHODE DE RESOLUTION

➤ Méthode de Runge Kutta d'ordre 4 [3]

La méthode de Runge-Kutta est une méthode numérique d'approximation de solution des équations différentielles. Elles ont été ainsi nommées en l'honneur des mathématiciens Carl Runge et Martin Wilhem Kutta qui élaborèrent cette méthode en 1901.

La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) est très couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles ordinaires (EDO), et très stable pour les fonctions courantes de la physique, elle est dérivée de la méthode d'Euler.

L'algorithme, noté RK4, s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_0 \text{ donné} \\ k_1 = h f(x_n, y_n) \\ k_2 = h f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 = h f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 = h f(x_n + h, y_n + k_3) \\ y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{array} \right. \quad (3-41)$$

Dans notre cas appliqué à un system de 3 équations différentielles

$$T_v^{i+1} = T_v^i + \frac{1}{6} h (K_{1v} + 2K_{2v} + 2K_{3v} + K_{4v}) \quad (3-42)$$

$$T_{abs}^{i+1} = T_{abs}^i + \frac{1}{6} h (K_{1abs} + 2K_{2abs} + 2K_{3abs} + K_{4abs}) \quad (3-43)$$

$$T_{is}^{i+1} = T_{is}^i + \frac{1}{6} h (K_{1is} + 2K_{2is} + 2K_{3is} + K_{4is}) \quad (3-44)$$

Avec les k définit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1v} = f_v (T_v^i, T_{abs}^i) \\ K_{2v} = f_v \left(T_v^i + \frac{h}{2} K_{1v}, T_{abs}^i + \frac{h}{2} K_{1abs} \right) \\ K_{3v} = f_v \left(T_v^i + \frac{h}{2} K_{2v}, T_{abs}^i + \frac{h}{2} K_{2abs} \right) \\ K_{4v} = f_v \left(T_v^i + h K_{3v}, T_{abs}^i + h K_{3abs} \right) \end{array} \right. \quad (3-45)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1abs} = f_{abs} (T_v^i, T_{abs}^i, T_{is}^i) \\ K_{2abs} = f_{abs} \left(T_v^i + \frac{h}{2} K_{1v}, T_{abs}^i + \frac{h}{2} K_{1abs}, T_{is}^i + \frac{h}{2} K_{1is} \right) \\ K_{3abs} = f_{abs} \left(T_v^i + \frac{h}{2} K_{2v}, T_{abs}^i + \frac{h}{2} K_{2abs}, T_{is}^i + \frac{h}{2} K_{2is} \right) \\ K_{4abs} = f_{abs} \left(T_v^i + h K_{3v}, T_{abs}^i + h K_{3abs}, T_{is}^i + h K_{3is} \right) \end{array} \right. \quad (3-46)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1is} = f_{is} (T_{abs}^i, T_{is}^i) \\ K_{2is} = f_{is} \left(T_{abs}^i + \frac{h}{2} K_{1abs}, T_{is}^i + \frac{h}{2} K_{1is} \right) \\ K_{3is} = f_{is} \left(T_{abs}^i + \frac{h}{2} K_{2abs}, T_{is}^i + \frac{h}{2} K_{2is} \right) \\ K_{4is} = f_{is} \left(T_{abs}^i + h K_{3abs}, T_{is}^i + h K_{3is} \right) \end{array} \right. \quad (3-47)$$

Avec les fonctions f sont défini comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial T_v}{\partial t} = f_v (T_v, T_{abs}) \\ \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} = f_{abs} (T_v, T_{abs}, T_{is}) \\ \frac{\partial T_{is}}{\partial t} = f_{is} (T_{abs}, T_{is}) \end{cases} \quad (3-48)$$

3-13 PROGRAMME PRINCIPAL D'UN CAPTEUR SOLAIRE

Le programme informatique élaboré est écrit en MATLAB. Il suit les démarches Suivantes :

1. Entrée des données et calcul des constantes.
 2. Calcul des différents coefficients d'échanges thermiques qui sont dépendants de la température à savoir :
 - Les coefficients d'échange thermique par conduction
 - Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement
 - Calcul des coefficients d'échange thermique par convection
 - Le coefficient d'échange thermique dû au vent.
 3. On calcule, à chaque pas de temps (on prend l'intervalle de temps entre 6h00 du matin et 22h00) :
 - Le rayonnement solaire frappant le capteur solaire.
 - La puissance absorbée par la vitre et la plaque absorbante.
 - La température ambiante et la température du ciel.
 4. Nous supposons au départ que chaque composant du capteur est à la température ambiante T_a , sauf les températures du fluide caloporteur, et de l'absorbeur, qui sont à des températures légèrement supérieures.
 - Calcul les propriétés du fluide caloporteur :
 - La masse volumique.
 - La conductivité thermique.
 - La viscosité dynamique.
 - La capacité thermique.
- Résolution du système d'équation obtenu par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

5. La quatrième étape est reprise avec les températures obtenues jusque on obtient la convergence du système.

3-14 CONCLUSION

Nous avons s'intéressé dans ce chapitre de présenter le modèle mathématique de l'éclairement solaire ainsi que le modèle qui définit les différents bilans thermiques pour chaque partie du capteur et on fait déterminer le gain ainsi que les différent échange thermique effectués dans le capteur solaire à eau.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

4-1 INTRODUCTION

Le programme mis au point a pour objet de simuler et d'estimer les performances thermiques instantanées du capteur solaire plan. Dans ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats des simulations effectués sur le capteur solaire plan. Cette simulation a pour but l'étude de l'influence des paramètres tels que le rayonnement solaire et le débit sur le rendement et la température de ce dernier.

Pour faire la simulation nous avons choisi le 21 juin et la ville de Ghardaïa ayant les caractéristiques suivantes [45]:

Latitude = $32,49^\circ$

Longitude = $3,67^\circ$

Altitude = 503 [m]

Albédo = 0,35

4-2 VALIDATION

Pour valider nos résultats, nous allons comparer nos résultats avec ceux de **A. AMICHE** et al [46] Comme la montre la figure 4-1.

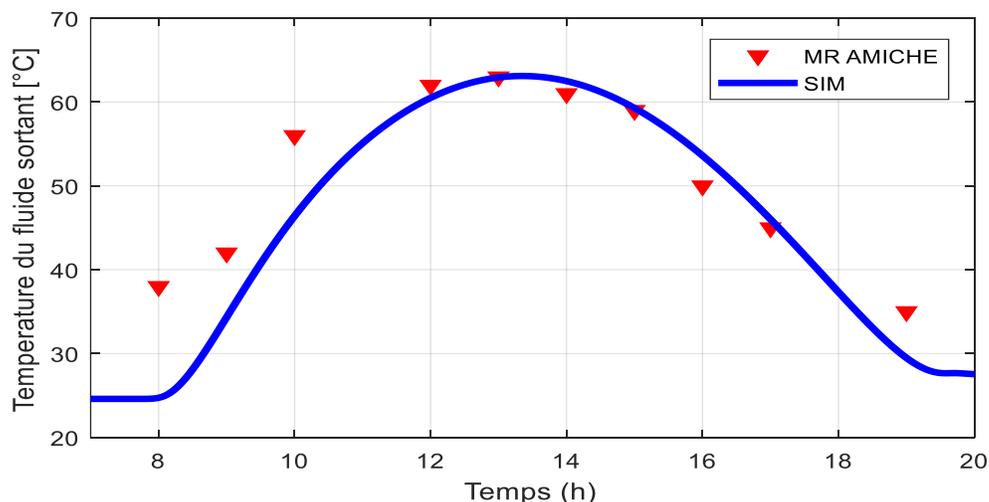


FIGURE 4-1 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DU FLUIDE SORTANT EN FONCTION DU TEMPS

D'après cette figure on remarque la température de sortie du fluide augment progressivement de 8h à 13h pour atteindre la valeur maximale de 64 °C qui va diminuer dans l'intervalle de 13h à 19h.

Ainsi que, on peut voir que notre résultat est en accord avec ceux de **A. AMICHE** et al [46].

4-3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.3.1 Evolution du rayonnement solaire

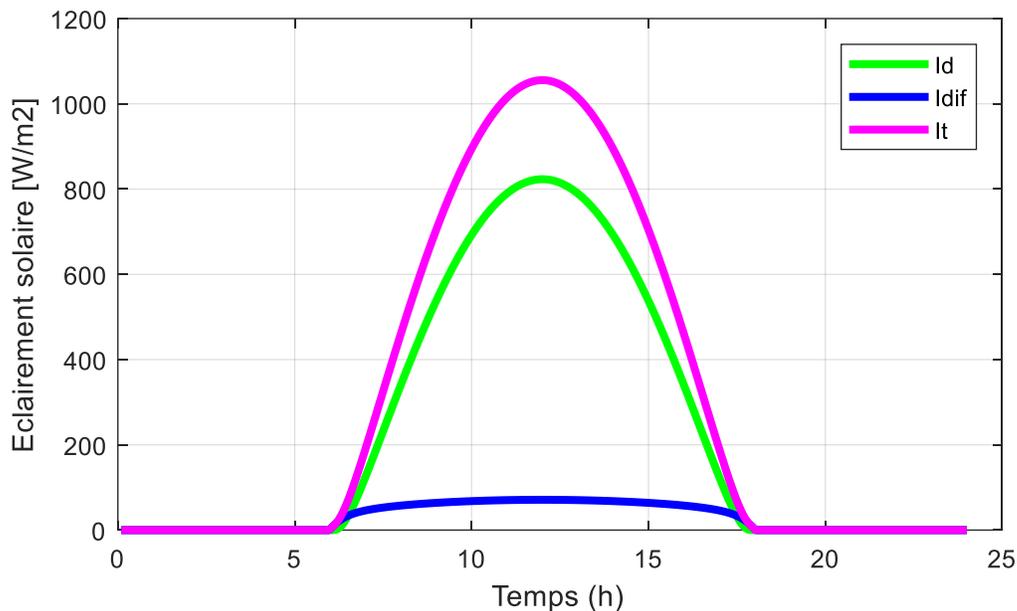


FIGURE 4-2 :EVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE EN FONCTION DU TEMPS

La figure 4.2 illustre l'allure du rayonnement solaire global a la forme d'une cloche. Il augmente avec la croissance du temps jusqu'à atteindre une valeur maximale aux environs de 13:00h (midi solaire) puis commence à diminuer jusqu'à atteindre zéro (coucher de soleil).

La composante diffuse commence à augmenter avec la composante directe mais sa croissance reste modérée pendant la journée, elle ne dépasse pas 80 w/m².

Finalement, sur les figures précédentes, on constate que la composante direct est la plus importante pour l'évolution du rayonnement solaire global on peut enregistrer presque une valeur supérieure de 800 W/m², pour une valeur du rayonnement solaire global de 1050 w/m².

4.3.2 Variation de la température d'ambiance et du ciel

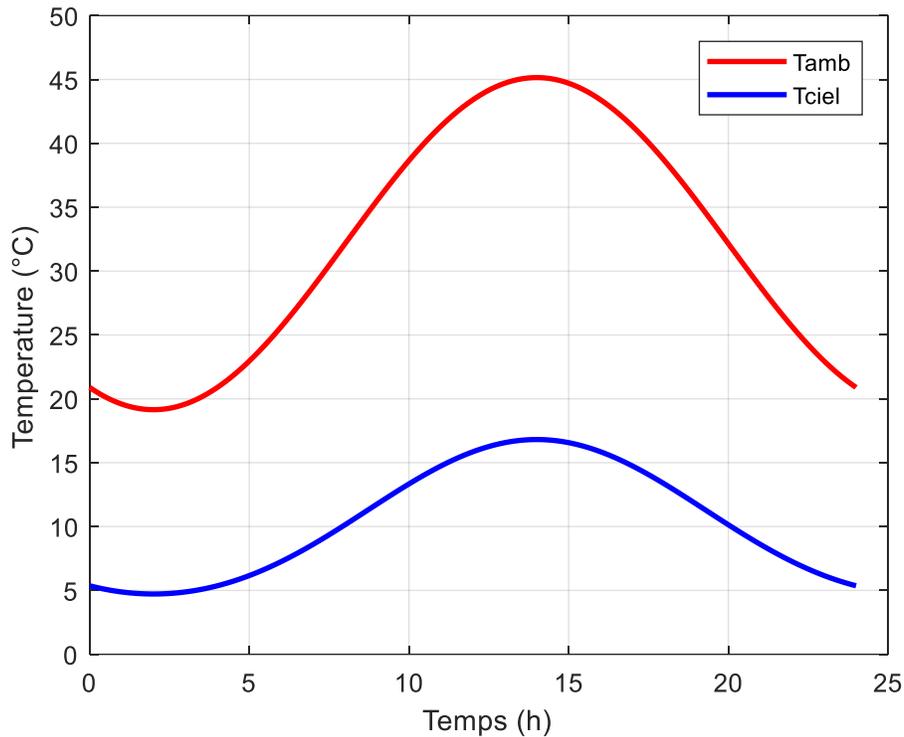


FIGURE 4-3 : VARIATION DE LA TEMPERATURE D'AMBIANCE ET DU CIEL EN FONCTION DU TEMPS

La figure 4-3 représente la variation de la température ambiante et de la température du ciel en fonction du temps. La température d'ambiance varie sinusoidalement avec le temps et la température du ciel varie en fonction de la température ambiante, et qui ont la même allure (figure 4-3) à cause de la proportionnalité existante entre elle. Ceci peut être expliqué par le comportement de Température du ciel par rapport à la Température d'ambiance. Elles atteignent leurs valeurs maximales à 14h.

4.3.3 Températures de différents composants du capteur

La figure présentée ci-dessus montre la variation temporelle des températures de différents composants du capteur solaire.

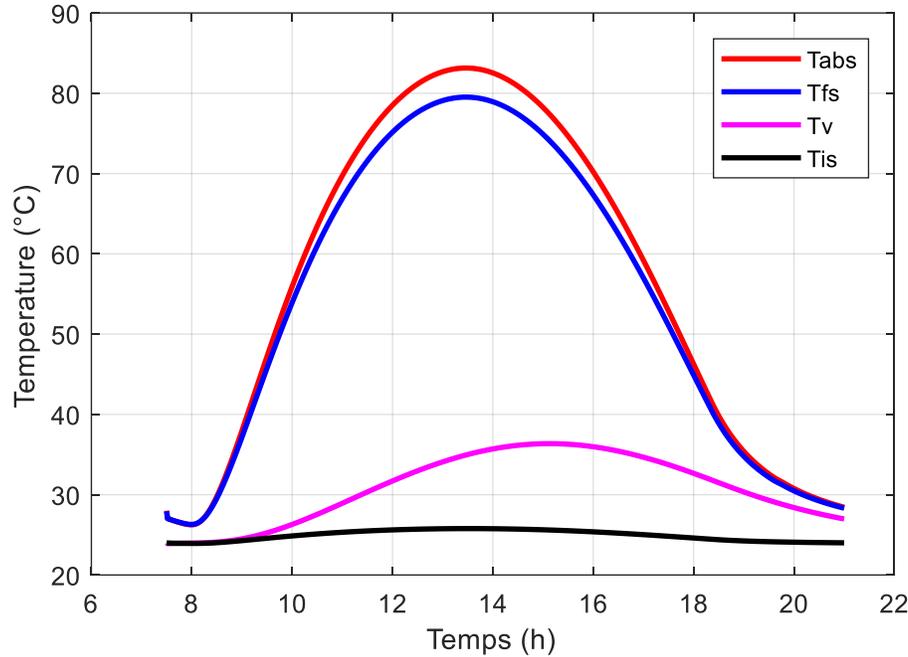


FIGURE 4-4 : VARIATION TEMPORELLE DES TEMPERATURES DE DIFFERENTS COMPOSANTS DU CAPTEUR

$$\dot{m} = 0,001 [kg / s] , T_{amb} = 24C^0$$

D'après la figure 4-4, on remarque que les différentes températures des composants du capteur solaire varient proportionnellement à la puissance absorbée par chaque composant et atteignent leurs valeurs maximales dans la période 13h-15h.

La température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbe, et dans un ordre décroissant vient la température de sortie du fluide caloporteur et cela est dû principalement au coefficient de convection entre l'absorbeur et du fluide sortant qui présente des valeurs importantes. Puis elle vient celle de la vitre, ceci s'explique par l'absorption du rayonnement incident d'une part, et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement et de convection d'autre part comme il transmet une bonne partie de l'énergie solaire à l'absorbeur. La température de l'isolant est la plus faible, et qui même étant proche de la température ambiante, du fait de son emplacement directement sous l'absorbeur et qui a une faible conductivité thermique que sa soumission à l'action du vent.

4.3.4 Puissance utile et rendement instantané

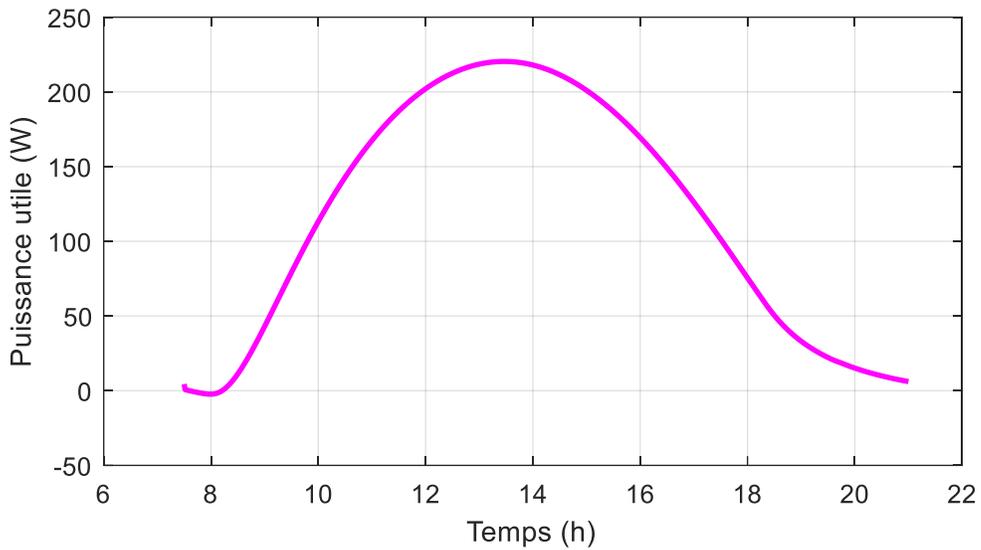


FIGURE 4-5 : VARIATION TEMPORELLE DE LA PUISSANCE UTILE

$$\dot{m} = 0,001 [kg / s] , T_{amb} = 24C^0$$

L’analyse du comportement d’un capteur au cours d’une journée (figure 4-5) montre que la puissance utile augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales à 15h00, qui va décroître progressivement à partir de 15h00

4.3.5 Rendement instantané

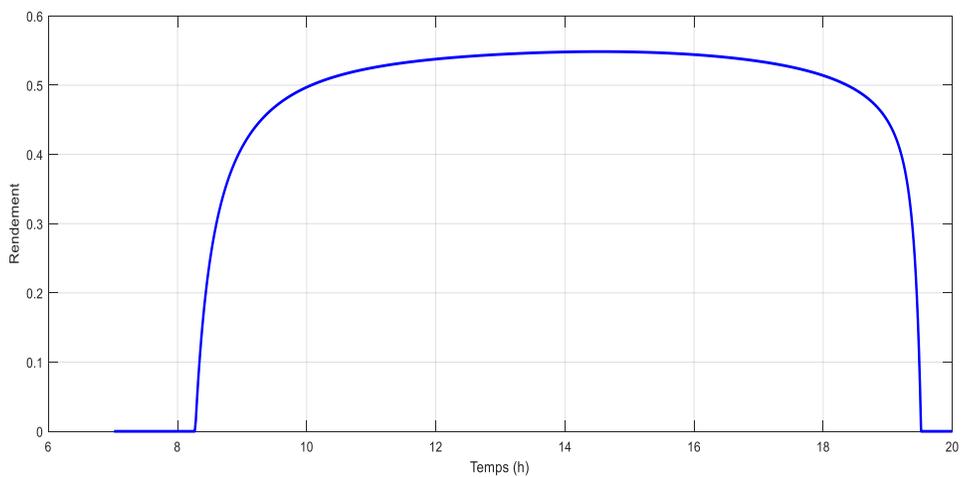


FIGURE 4-6 : VARIATION TEMPORELLE DU RENDEMENT INSTANTANE

$$\text{AVEC } \dot{m} = 0,3 [kg / s] , T_{amb} = 24C^0$$

La figure 4-6 représente l'évolution temporelle du rendement instantané du capteur solaire plan.

Nous remarquons également que le rendement instantané commence augmenter avec le rayonnement solaire. Avant 10h le rendement croit rapidement avec le rayonnement solaire jusqu' il atteint son maximum (presque 55%) de 12h à 14h où la variation presque constante puis il commence a diminué rapidement avec le temps pour attendre des valeurs négatives à 19h50 min.

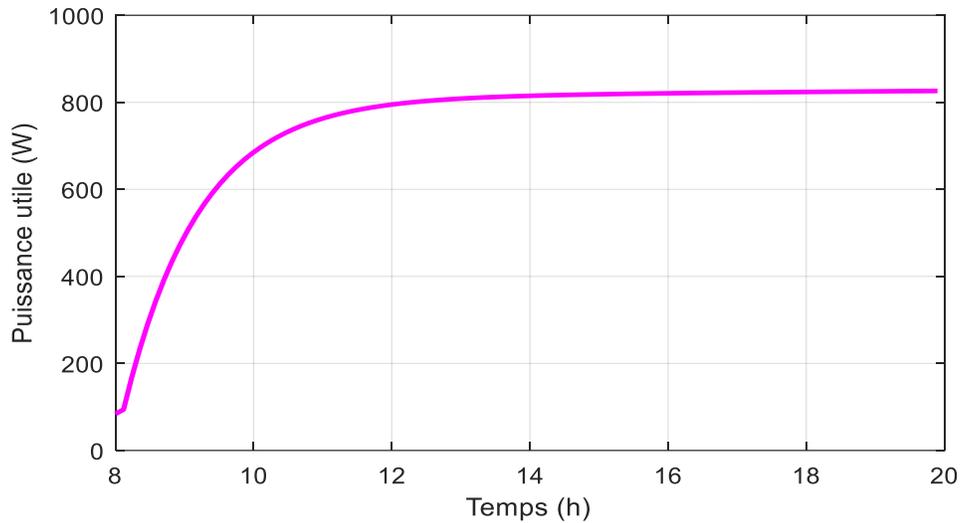


FIGURE 4-7 :VARIATION DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DU TEMPS

$$\dot{m} = 0,3 [kg / s] , T_{amb} = 24C^0 , I_t = 1000 [w / m^2]$$

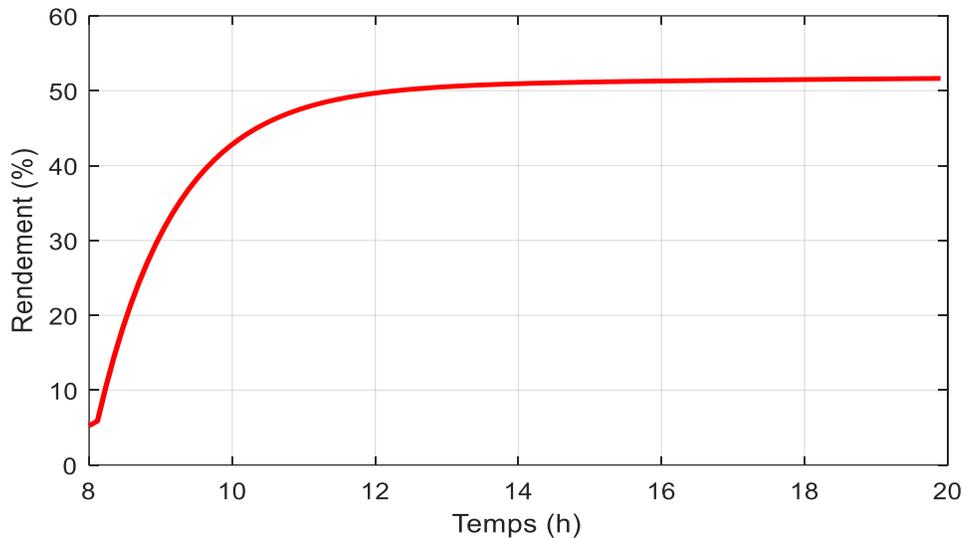


FIGURE 4-8 :VARIATION DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DU TEMPS

$$\text{Avec } \dot{m} = 0,3 [kg / s] , T_{amb} = 24C^0 , I_t = 1000 [w / m^2]$$

Les figures 4-7 et 4-8 représentent la variation de la puissance utile et le rendement avec le temps.

Il est évident que la puissance utile récupérée par le fluide de travail dépend étroitement du rayonnement solaire global. Ainsi et comme le montre la figure 4-7, la puissance utile est une fonction exponentielle croissante due au rayonnement solaire.

En outre, le rendement instantané du capteur est similaire à la courbe de la puissance utile c'est tout à fait logique puisque le rendement est proportionnel directement avec la puissance utile comme la montre la figure 4-8.

4.3.6 Influence du débit sur le rendement

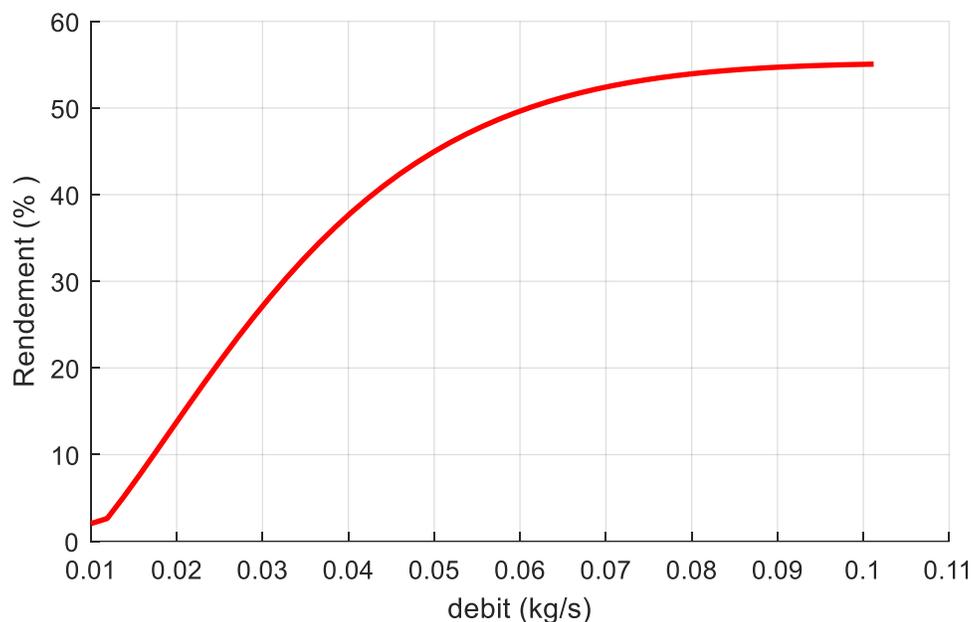


FIGURE 4-9 :INFLUENCE DU DEBIT SUR LE RENDEMENT

La figure 4-9 montre l'évolution du rendement du capteur avec le débit, il apparaît que le rendement instantané augmente en fonction du débit du fluide. En effet, l'augmentation du débit entraîne directement l'accroissement de la vitesse d'écoulement du fluide d'où l'augmentation du nombre de Reynolds qui est un nombre adimensionnel caractérisant le type de l'écoulement du fluide qui peut être laminaire, transitoire ou turbulent.

D'une autre part, l'augmentation du débit augmente la capacité calorifique du fluide caloporteur, d'où l'accroissement de la chaleur utile qui influe favorablement sur le rendement instantané du capteur.

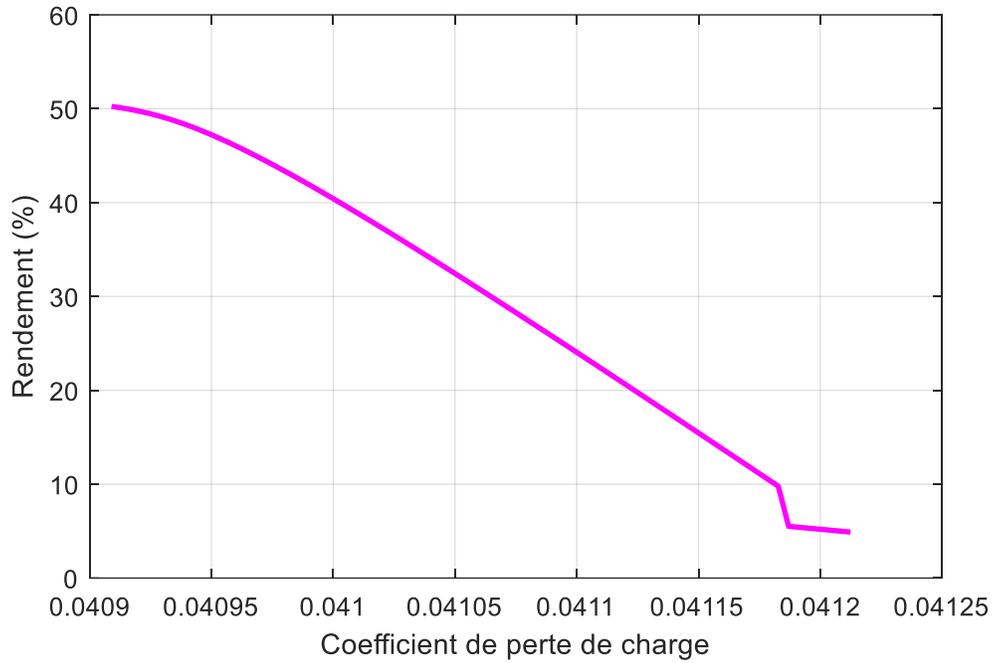


FIGURE 4-10 : INFLUENCE DE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE SUR LE RENDEMENT

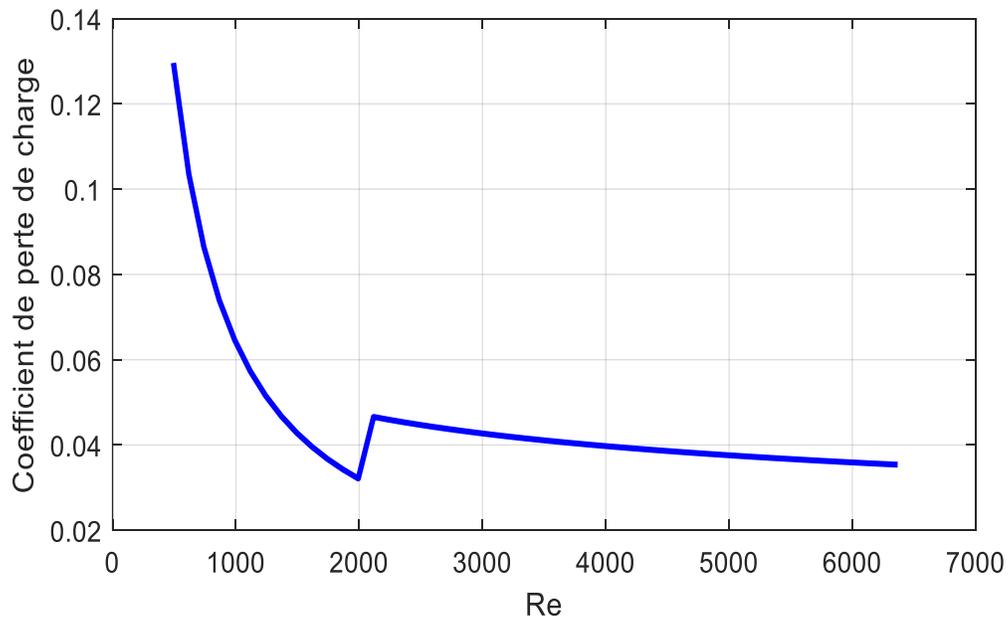


FIGURE 4-11 : INFLUENCE DE NOMBRE DE REYNOLDS SUR LE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE

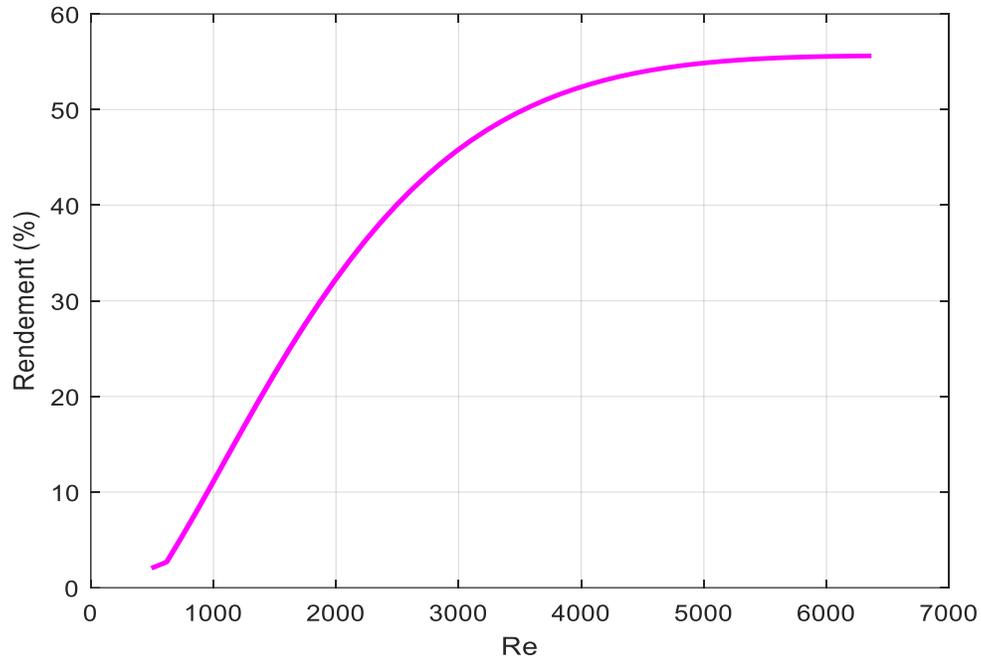


FIGURE 4-12 : INFLUENCE DE NOMBRE DE REYNOLDS SUR LE RENDEMENT

Le courbe 4-10 représente la variation du rendement en fonction du coefficient de perte de charge, on voit que le rendement diminue avec l'augmentation du coefficient de perte de charge. Les courbes 4-11 et 4-12 représentent respectivement la variation du coefficient de perte de charge et le rendement en fonction du nombre de Reynolds, on remarque qu'avec l'augmentation du nombre de Reynolds le coefficient de perte de charge diminue qui conduit à l'augmentation du rendement.

On en déduit que l'augmentation du débit va augmenter la turbulence de l'écoulement d'où la favorisation de transfert thermique convectif et par conséquent l'augmentation du rendement du capteur.

4-4 ETUDE PARAMETRIQUE

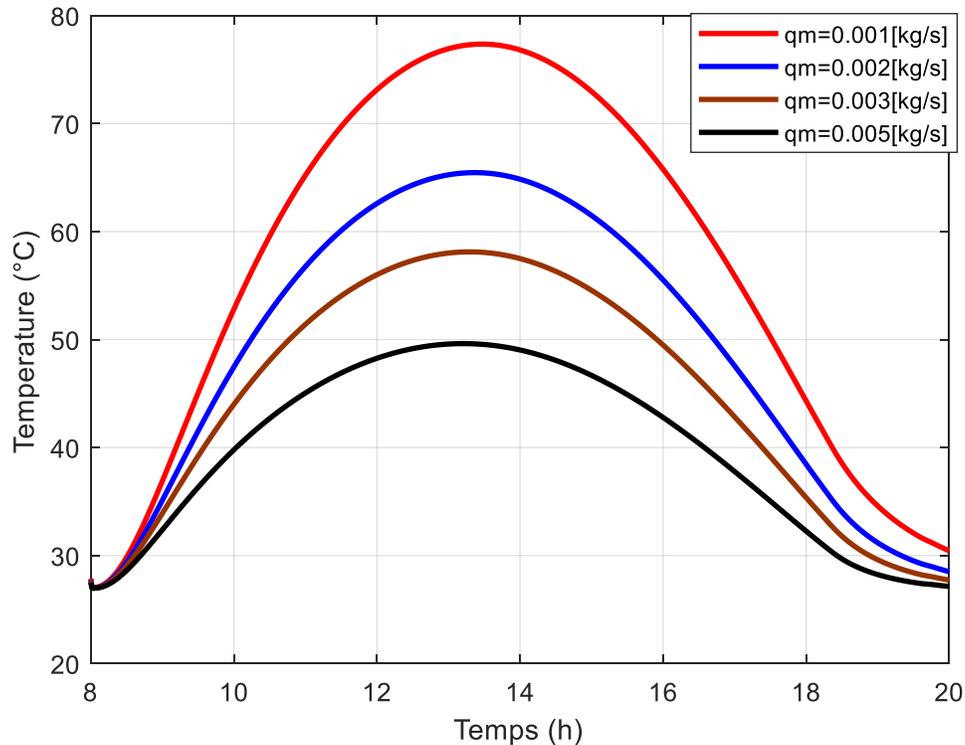
4.4.1 Température du fluide sortant

FIGURE 4-13 : VARIATIONS TEMPORAILLE DU TEMPERATURE DU FLUIDE SORTANT

Sur la figure 4-13 nous avons présenté l'influence du débit sur la variation temporelle de la température du fluide sortant.

D'après cette figure on remarque que la diminution du débit conduit à l'accroissement de la température du fluide sortant pour atteindre une température maximale 78 C° pour un débit massique de 0,001 kg/s.

Toutefois, il n'est pas toujours intéressant de travailler avec un débit élevé; car un débit élevé signifie que l'énergie utile récupérée est certes plus importante mais de moindre qualité car à une température plus faible.

4.4.2 Température de l'absorbeur

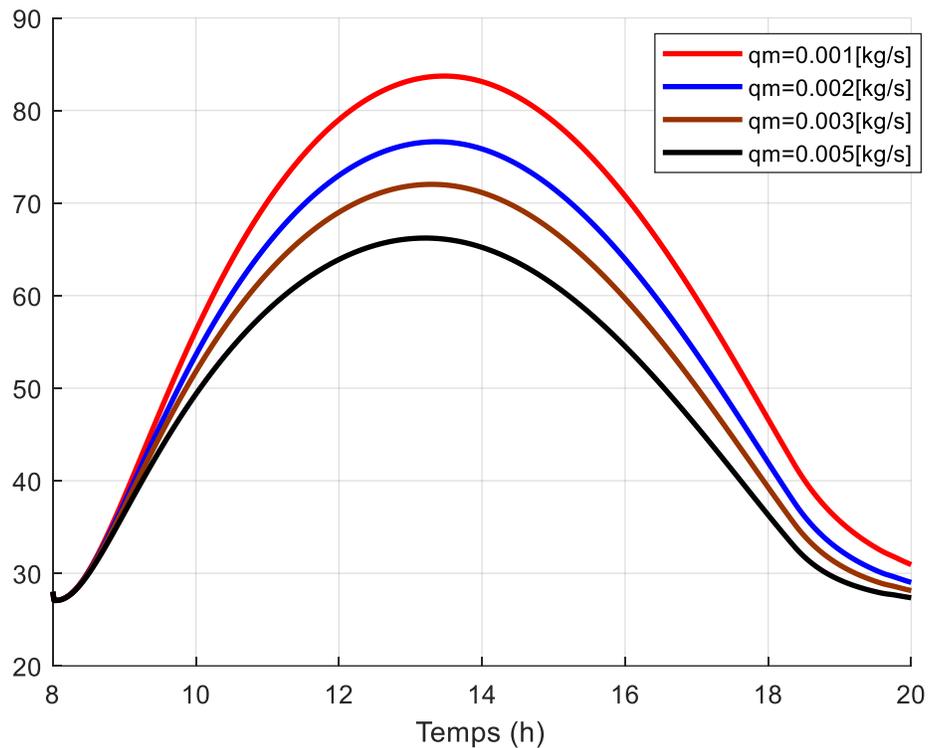


FIGURE 4-14 : VARIATIONS TEMPORAIRE DU TEMPERATURE DE L'ABSORBEUR

La figure représentant l'influence du débit sur la variation journalière de la température de l'absorbeur est montrée sur la figure 4-14.

D'après cette figure, on remarque que la diminution du débit a un effet important sur l'élévation de la température d'absorbeur, en effet par exemple pour qu'on obtienne une température d'absorbeur de 84 C° on doit choisir un débit de $0,001\text{ kg/s}$

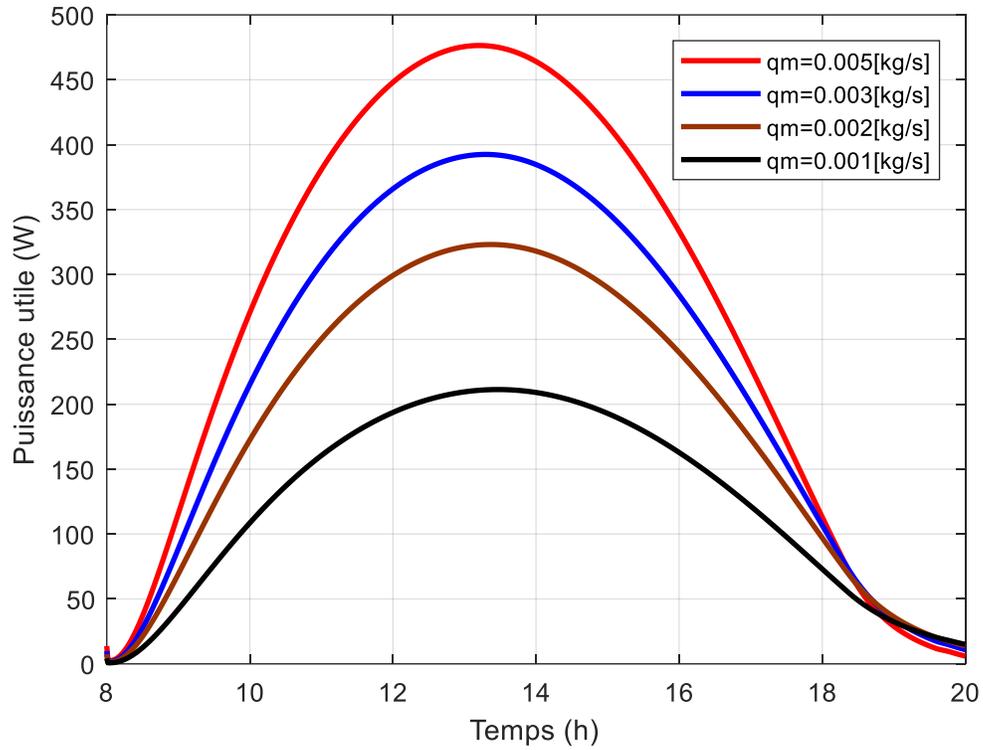


FIGURE 4-15 : VARIATION DE PUISSANCE UTILE AVEC LE TEMPS

La courbe ci-dessus représente la variation de la puissance absorbée par le fluide au cours du temps pour des différents débits. On voit que la courbe de puissance a la même allure que la courbe de rayonnement, et d'autre part lorsque on accroît le débit massique la puissance utile va élever pour obtenir une valeur maximale de 480 W pour un débit de 0,005 kg/s.

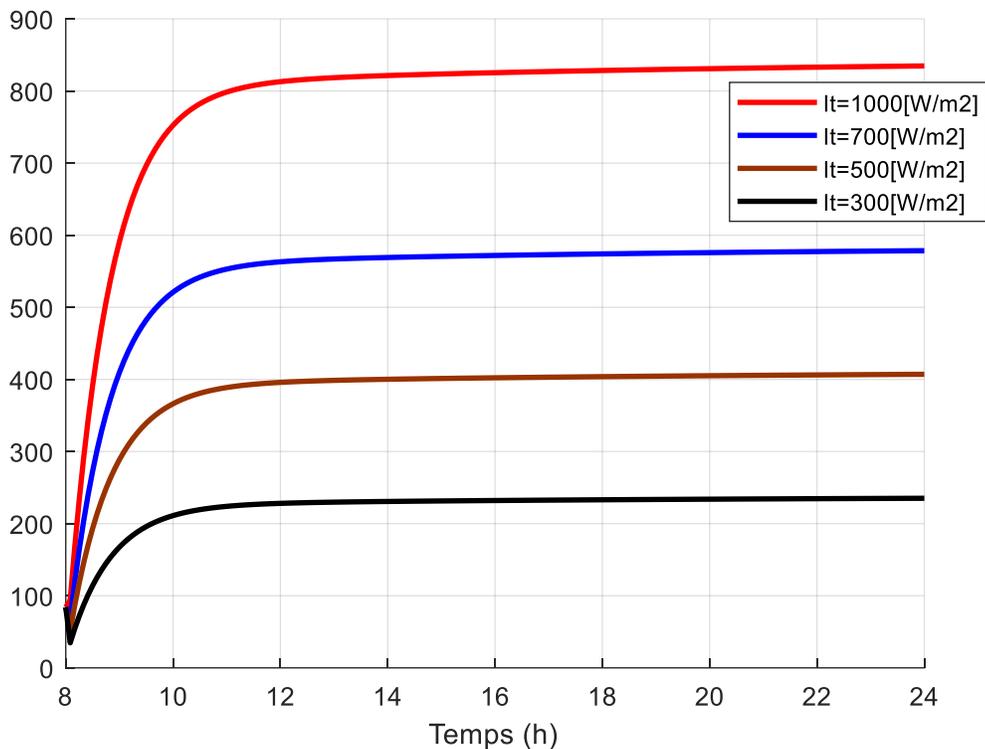


FIGURE 4-16 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE SUR LA PUISSANCE UTILE

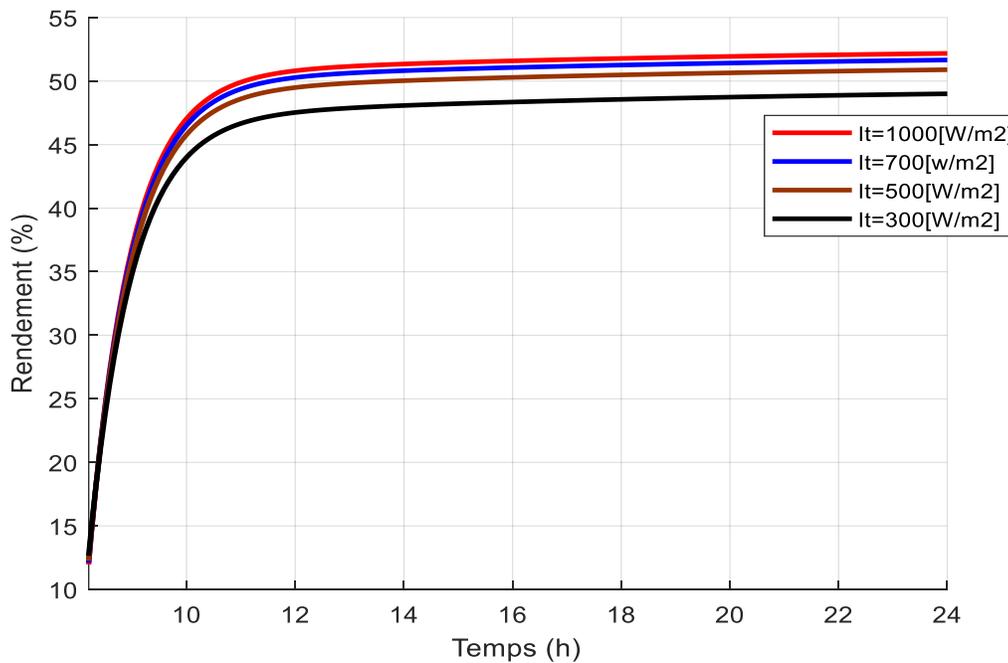


FIGURE 4-17 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE SUR LE RENDEMENT

Sur la figure 4-16 et 4-17 on a illustré les évolutions des courbes et variations de la puissance utile et du rendement pour différents valeurs d'éclairement, on observe que le profil de la puissance utile et le rendement prennent même l'allure à cause de la proportionnalité existante entre la puissance utile et le rendement. Donc l'augmentation de l'éclairement solaire absorbé par le capteur, entraîne à l'élévation de la puissance utile et du rendement.

4.4.3 Influence de la vitesse du vent sur le rendement

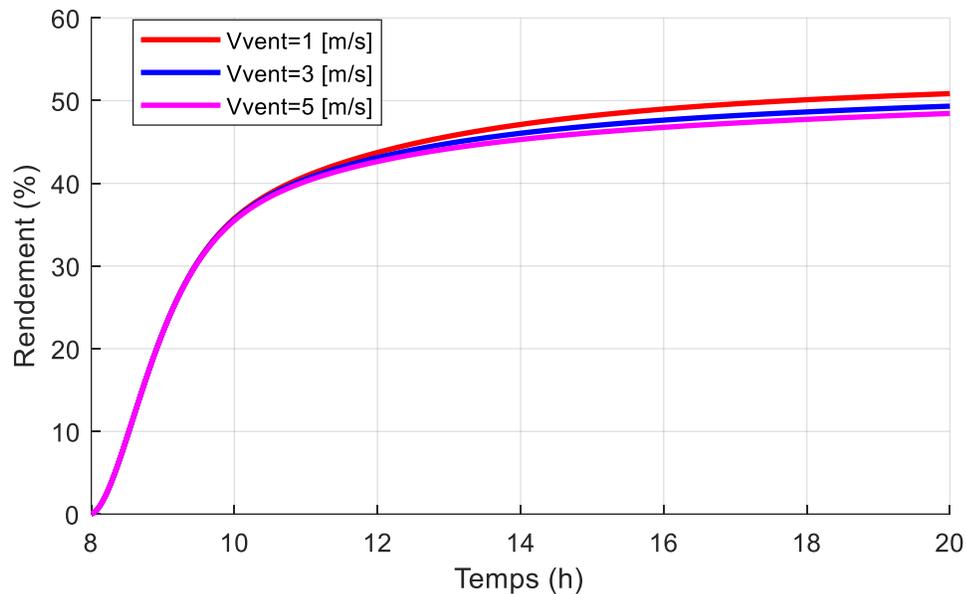


FIGURE 4-18 : INFLUENCE DE LA VITESSE DU VENT SUR LE RENDEMENT

$$\dot{m} = 0,3 [kg / s] , T_{amb} = 24C^0 , I_t = 1000 [w / m^2]$$

L'influence de la vitesse du vent sur le rendement instantané du capteur est illustrée sur la figure 4-18, On constate que les faibles vitesses sont plus favorables.

En effet, pour une même valeur de l'éclairement solaire, l'accroissement de la vitesse du vent provoque une baisse des températures des éléments du capteur notamment de sa couverture (vitre) en conséquence une augmentation des pertes thermique vers l'avant du capteur ce qui conduit à un rendement moindre.

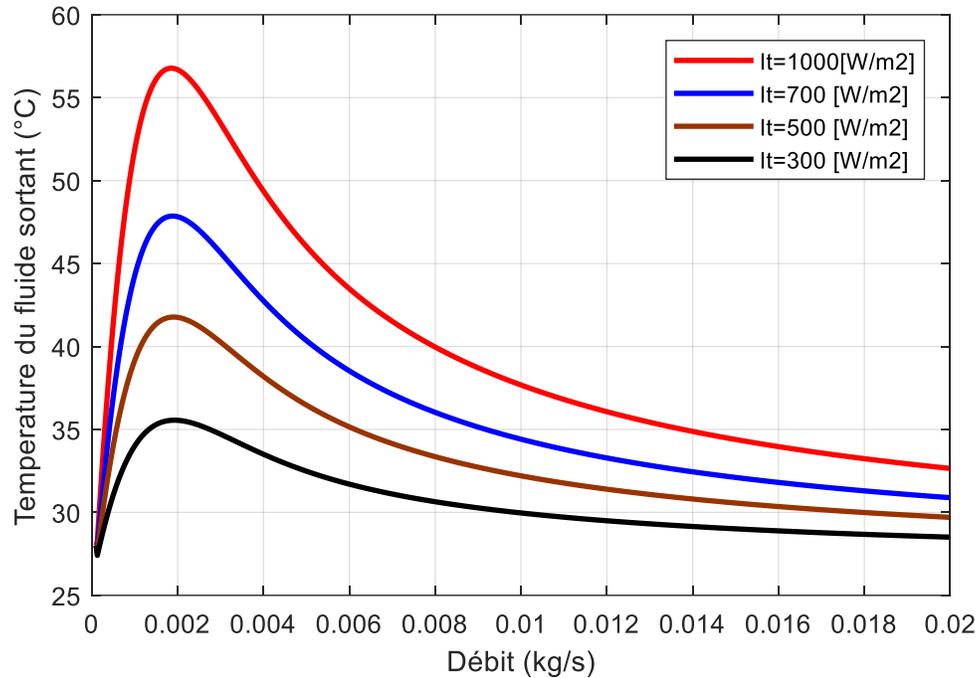


FIGURE 4-19 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LA TEMPERATURE DU FLUIDE A SA SORTIE DU CAPTEUR EN FONCTION DU DEBIT

La figure 4-19 représente l'influence de l'éclairement solaire sur la variation du fluide sortant en fonction du débit. Nous notons que toujours avec l'augmentation de débit, la température du fluide à sa sortie diminue.

En d'autres termes, lorsque l'on augmente le débit massique, la température du fluide va diminuer, ce qui est tout à fait logique puisque la capacité calorifique va augmenter. À son rôle, elle nécessite une grande quantité de chaleur.

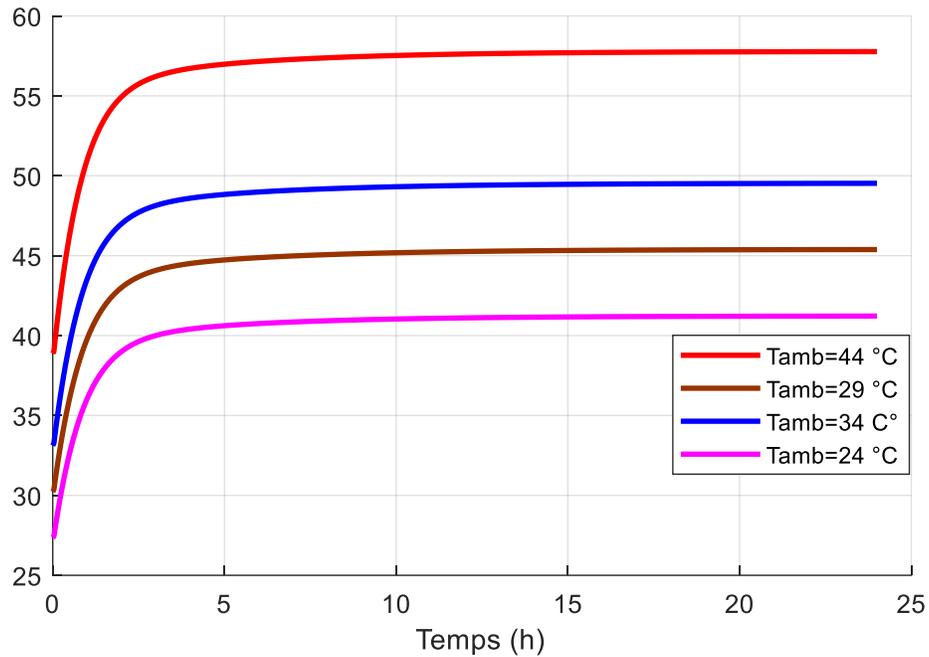
4.4.4 Influence de la température ambiante

FIGURE 4-20 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR LE TEMPERATURE DU FLUIDE SORTANT

$$\dot{m} = 0,01[\text{kg} / \text{s}] , I_t = 1000[\text{W} / \text{m}^2]$$

La diminution de la température ambiante conduit à une baisse de la température au niveau des différents composants du capteur (vitre, absorbeur, fluide) et par conséquent à une décroissance de la température du fluide à sa sortie (figure 4-20).

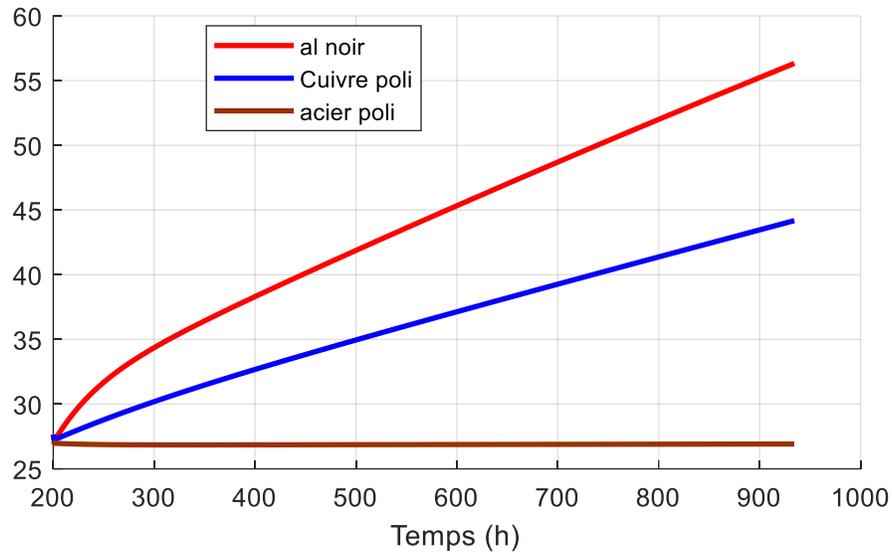


FIGURE 4-21 : INFLUENCE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES SUR LA TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE

La figure 4-21 représente l'influence du matériau de la plaque absorbante sur la variation température de sortie de fluide. Du fait de leurs conductivités thermiques, il est évident de constater qu'une plaque absorbante en aluminium en peinture noir conduit à obtenir une meilleure performance que celle en cuivre poli ou en acier poli.

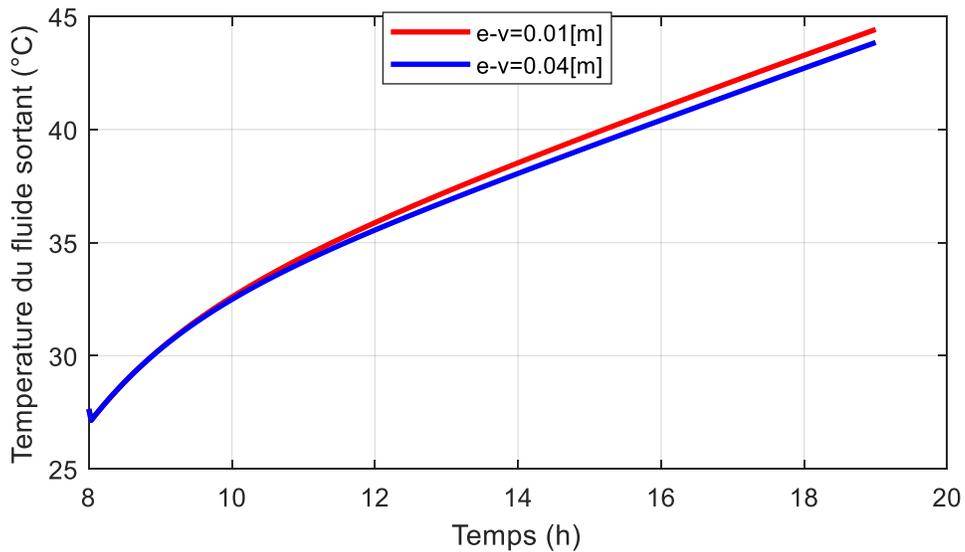


FIGURE 4-22 : INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE LA VITRE SUR LA TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE

La figure 4-22 montre que la température du fluide sortant peut-être améliorée avec une faible épaisseur de la vitre. En effet, plus l'épaisseur du vitrage est petite, plus sa capacité calorifique est négligeable et plus son inertie thermique est faible en conséquence un coefficient de transmission plus élevé d'où une augmentation de la température du capteur qui se traduit par un rendement meilleur.

4.4.5 Influence de l'épaisseur de l'isolant sur la température de sortie du fluide

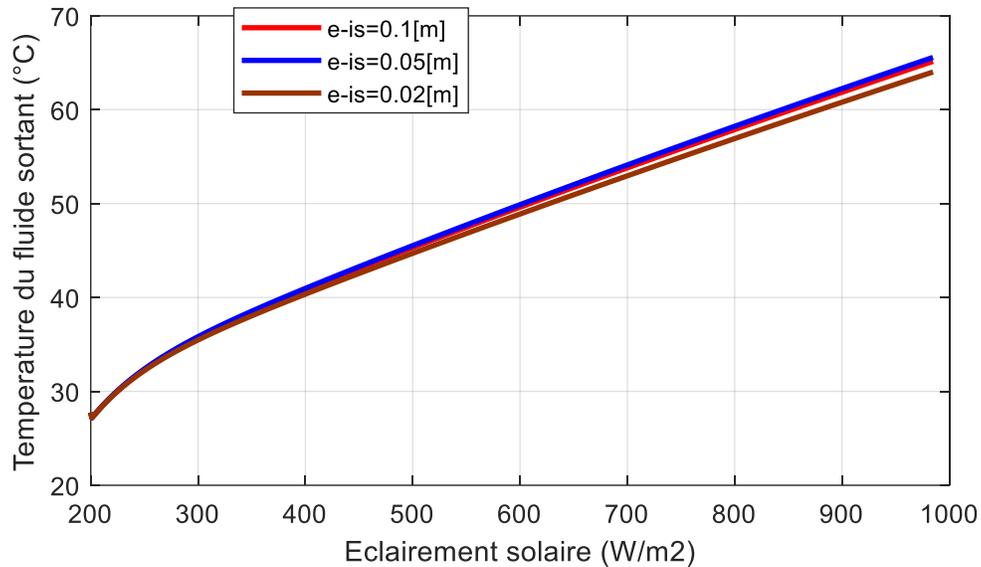


FIGURE 4-23 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT SUR LA TEMPÉRATURE DE SORTIE DU FLUIDE $\dot{m} = 0,3 [kg / s]$

La figure 4-23 montre l'influence de l'épaisseur de l'isolant sur la température du fluide.

On constate que plus l'épaisseur est grande plus la température est élevée. En effet, plus on augmente l'épaisseur de l'isolant plus les pertes à l'arrière du capteur sont faibles et donc un rendement meilleur. Toutefois une optimisation de cette épaisseur est nécessaire pour avoir un meilleur compromis rendement-coût.

4-5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons vu l'influence des différents paramètres sur les performances thermiques d'un capteur solaire plan à eau. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur plan. Il apparait clairement que le rendement instantané et la température du fluide sont des fonctions proportionnelles de l'éclairement solaire globale qui joue un rôle prépondérant. En outre, l'augmentation du débit favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude que nous avons menée sur le capteur solaire, consiste à l'étude thermique et dynamique d'un capteur solaire à eau.

Dans la première partie nous avons modélisé le rayonnement solaire direct, diffus et global et dans la deuxième partie nous avons développé un modèle numérique qui décrit le comportement thermique d'un capteur solaire à eau.

Afin d'appréhender l'influence de la variation des conditions opératoire (débit massique, l'éclairement solaire) sur le comportement thermique et dynamique du capteur étudié nous avons simulé, dans cette étude, les échanges de chaleur au sein de ce capteur qui est basée sur la résolution de système d'équations différentielles

La méthode de différences finies (Runge-Kutta d'ordre 4) a été utilisée pour résoudre le système d'équations différentielles obtenu.

Cette étude a montré que l'accroissement de débit massique et de l'éclairement solaire a un effet très important à l'élévation de la puissance utile qui à son rôle fait à augmenter le rendement du capteur solaire étudié.

Les résultats obtenus, dans les différentes conditions opératoires, ont montré que :

-Le modèle numérique utilisé nous a permis d'obtenir un bon accord entre les valeurs prédites et les résultats expérimentaux.

Au regard des résultats obtenus, de nombreuses perspectives peuvent être envisagées :

- L'intégration d'un système de stockage de l'énergie solaire à fin d'utiliser dans la nuit.
- L'étude d'un modèle économique pour estimer le coût du capteur solaire.
- Faire une étude comparative de montage des capteurs solaires à eau en série et en parallèle

Nous souhaitons enfin, que ce travail puisse contribuer à sensibiliser davantage les étudiants sur l'intérêt de la modélisation des capteurs.

ANNEXES

PROPRIETES THERMIQUES ET OPTIQUES DES DIFFERENTS COMPOSANTS DU CAPTEUR PLAN

Les caractéristiques thermo physiques des matériaux métalliques pouvant constitués l'absorbeur d'un capteur solaire plan sont regroupés dans le tableau (A-1)

TABLEAU A-1 : CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX METALLIQUES

Métal	Conductivité Thermique (W/m.K)	Masse Volumique (kg/m ³)	Chaleur Massique (j/kg.K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Acier inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes sont listés dans le tableau A-2

TABLEAU A-2 : PROPRIETES OPTIQUES ET THERMIQUES DE QUELQUES SURFACES TRANSPARENTES

Matériau	Epaisseur (mm)	Transmissivité (%)	Masse Volumique (kg/m ³)	Chaleur Massique (j/kg.K)	Conductivité Thermique (W/m.K)
Verre à vitre	3	85-92	2700	840	0.93
Polycarbonate	3.2	82-89	1200	1260	0.2
Polyméthacrylate	3.2	89-92	1200	1460	0.2
Polyester armé	1	77-90	1400	1050	0.21
Polyfluoéthyle Propylène	0.05	97	2.51	1170	0.25
Polyfluorure vinyle	0.1	93	1.5	1380	0.12

Annexe A

Le tableau A-3 regroupe le degré d'émissivité de quelques matériaux

TABLEAU A-3 : DEGRE D'EMISSIVITE DE QUELQUES MATERIAUX

Matériaux	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Beton	20	0.93
Glace lisse	0	0.97
Fer poncé	20	0.24
verre	90	0.94
Cuivre légèrement ternis	20	0.04
Cuivre oxydé	130	0.76
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

Le tableau A-4 donne les propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants

TABLEAU A-4 : PROPRIETES THERMIQUES DE QUELQUES MATERIAUX ISOLANTS

Matériau	Conductivité Thermique (W/m.K)	Masse volumique (kg /m3)	Chaleur Massique (J/kg.K)	Diffusivité Thermique 10 ⁻⁷ m2/s
Air à 20 °C	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine de roche	0.04	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47
Feutre d'amiante	0.047	116	800	5.1
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9

Annexe A

Perlite	0.048	60	840	9.5
Silicate de calcium	0.052	200	920	2.8
Magnésie	0.055	200	880	3.1
Béton cellulaire	0.075	280	800	3.3
Vermiculite	0.09	80	880	12.8
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pain	0.118	500	1210	1.95
Papier	0.14	700	1340	1.5
Bois de sapin	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc	0.153	1200	2170	0.6
Pvc	0.166	1380	1000	1.2
Bois de chêne	0.198	825	2400	1.0
Plâtre	0.35	800	800	5.5
Brique	0.697	1700	900	4.6

CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DE L'EAU ET AIR

Propriétés de l'eau à saturation							Propriétés de l'air à 1 atm						
θ	ρ	c_p	λ	$10^4 \cdot \mu$	$10^7 \cdot \alpha$	Pr	θ	ρ	c_p	λ	$10^5 \cdot \mu$	$10^5 \cdot \alpha$	Pr
(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m ² /s)		(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m ² /s)	
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31	13,06	0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43	7,02	20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	995	4178	0,628	6,55	1,51	4,34	40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	985	4184	0,651	4,71	1,55	3,02	60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	974	4196	0,668	3,55	1,64	2,22	80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	960	4216	0,680	2,82	1,68	1,74	100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	945	4250	0,685	2,33	1,71	1,45	120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	928	4283	0,684	1,99	1,72	1,24	140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	910	4342	0,680	1,73	1,73	1,10	160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	889	4417	0,675	1,54	1,72	1,00	180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	867	4505	0,665	1,39	1,71	0,94	200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	842	4610	0,652	1,26	1,68	0,89	220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	816	4756	0,635	1,17	1,64	0,88	240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	786	4949	0,611	1,08	1,58	0,87	260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	753	5208	0,580	1,02	1,48	0,91	280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	714	5728	0,540	0,96	1,32	1,02	300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

Corrélations entre 0 et 100 °C

(θ : température en °C , T température en K)

Pour l'air

- $\rho = \frac{353}{(\theta + 273)}$ kg m⁻³
- $c_p = 1008$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \theta + 0,0242$ W m⁻¹ °C⁻¹ $r^2 = 0,9999$
- $\mu = 10^{-5} (0,0046 \theta + 1,7176)$ Pa s $r^2 = 0,9997$
- $\alpha = 10^{-5} (0,0146 \theta + 1,8343)$ m² s⁻¹ $r^2 = 0,9986$
- $Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} \theta + 0,7147$ $r^2 = 0,9767$
- $\beta \approx \frac{1}{T}$ K⁻¹

Pour l'eau

- $\rho = -0,00380 \theta^2 - 0,0505 \theta + 1002,6$ kg m⁻³ $r^2 = 0,9982$
- $c_p = 4180$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = -9,87 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 2,238 \cdot 10^{-3} \theta + 0,5536$ W m⁻¹ °C⁻¹ $r^2 = 0,9987$
- $\mu = 10^{-4} (0,00200 \theta^2 - 0,3389 \theta + 17,199)$ Pa s $r^2 = 0,9815$
- $\alpha = 10^{-7} (-0,00360 \theta + 1,340)$ m² s⁻¹ $r^2 = 0,9734$
- $Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} \theta^2 - 0,261 \theta + 12,501$ $r^2 = 0,9796$
- $\frac{g\beta\rho^2 c_p}{\mu\lambda} = (0,0105\theta^2 + 0,477\theta - 0,0363) 10^9$ °C⁻¹ m⁻³ $r^2 = 0,9992$
- $\log_{10} [p_{sat}(T)] = 20,3182 - \frac{2795}{T} - 3,868 \log_{10}(T)$ mmHg $-50^\circ\text{C} < \theta < 200^\circ\text{C}$
- $L_v = 2495 - 2,346 \theta$ kJ.kg⁻¹ $0^\circ\text{C} < \theta < 100^\circ\text{C}$

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. Benkhalifa**, « Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur ». Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla (2012) .
- [2] **S. Souad**, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister Université Mentouri de Constantine (2010).
- [3] **K. Salima**, « Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan- capteur et distillateur hot box-capteur ». Mémoire de magister Université Mentouri de Constantine (2009).
- [4] **M. Sandali**, « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux » mémoire de magister Université Abou bekr belkaid (2014)
- [5] **O.A Sid ahmed, T. Si tayeb**, « Etude thermique d'un capteur solaire plan à air, muni de rugosités artificielles des formes cylindriques en vue d'améliorer ses performances » mémoire de master Université Ibn Khaldoun Tiaret (2015)
- [6] **A. Dalila**, « Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives ». Thèse de magister (2010).
- [7] **M.A Amraoui**, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité », mémoire de magister (2012).
- [8] **M. Bouhediba** « Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS) » mémoire de master, Université Hassiba Benbouali de Chlef, (2012).
- [9] **A. Brahim** « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau » mémoire de master, Université De Lorraine (2016)
- [10] **G. ANIES** « Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption » thèse de doctorat, (2011)
- [11] **A. BENAHMED** « Simulation numérique des transferts thermiques dans un capteur solaire plan à air à double passe », mémoire de master, Université Ibn khaldoun Tiaret, (2016)
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [12] **D. Ababsa** « Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives » mémoire de magister, université el-hadj lakhdar-Batna.2010).
- [13] **A. Laaraba** « Etude numérique du transfert thermique dans un capteur solaire thermique en présence des partitions attachées à son vitrage », mémoire de magister, université hadj lakhdar batna ,(2014)
- [14] **A. Benkhelifa**, « Optimisation d'un Capteur Solaire Plan ». Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique, pp. 13-18. (1998)
- [15] **F. Mokhtari et D. Semmar**. « Etude Expérimentale d'un Capteur Solaire à Air ». Rev. Energ. Ren. : Valorisation 243-246 (1999).
- [16] **ABDI. H et MESSAOUDENE, N. Ait**. « Etude expérimentale et théorique des performances de deux capteurs plans à contact direct eau–plaque d'absorption » Revue des Energies Renouvelables, Chemss, p 53-60, (2000).
- [17] **S. Youcef-Ali**, « Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates», with various glazing, Renewable Energy, 30 pp. 271 280, (2005)
- [18]**T. Koyuncu** «Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications » Renewable Energy 31, 1073–1088, (2006).
- [19]**Gao W, Lin W, Liu T, Xia C**.«Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters ». Applied Energy; 84(4):425–41,(2007)
- [20] **K. AOUES** et al « Etude de l'influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 219 – 227, (2008)
- [21] **F. Ben Yelles, B. Benabadji, B. Benyoucef, Z. Ziani**. « Comparaison entre un capteur a aérogel de silice et d'autres capteurs plans ». 13èmes Journées Internationales de Thermique Albi, France, (2007)
- [22] **K. Aoues, N. Moumni et al** « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra » Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 237 – 248 ,(2009).
- [23] **J.M Chassériaux**, « Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, (1984).
- [24] **M. Capderou**, « Atlas solaire de l'Algérie » Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, (1987).
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [25] **I. Tabet**, « Etude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire » mémoire de doctorat Université des Freres Mentouri Constantine (2016)
- [26] **B. Zitani**, « Etude et Modélisation du Comportement en Régime Transitoire d'un Capteur Solaire Plan » mémoire de magister Université Badji Mokhtar Annaba (2007)
- [27] **F. Benmeriem**, « Contribution à l'analyse de la faisabilité énergétique d'une installation de production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire » mémoire de magister Hassiba Benbouali Chlef (2009)
- [28] **M.Alia** « Modélisation des capteurs solaires plans à air destinés au séchage {Convection forcée} » mémoire de magister Université Ibn Khaldoun Tiaret (2005)
- [29] **A.Kaddour** « Modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un rendement optimal » thèse de doctorat université Abou bekr belkaid Telemcen (2013).
- [30] **R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz**, « Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, (1979)
- [31] **A.A. SFEIR, G. GUARRACINO**, « Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat » Technique et documentation (1981).
- [32] **P.,Couards, H.,Michel**, « Bilan thermique d'une maison solaire, méthode de calcul rapide», *Éditeur Paris*, (1979).
- [33] **N.Bellel**, « Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur » thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).
- [34] **I. ZEGHIB** « Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique » mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, (2015).
- [35] **P, H, Communay**, « Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Édition » France. (2002).
- [36] **F.Kalla** « Conversion thermodynamique de l'énergie solaire: Etude et modélisation d'un capteur solaire » mémoire de magister, Université de Batna , (2014)
- [37] **John A. Duffie** «Solar Engineering of Thermal Processes » Fourth Edition, P14, (2013).
- [38] **S.V. Patankar** « Numerical heat transfer and fluid flow » (1980).
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [39] SAULNIER J.B., ALEXANDRE A., « La modélisation thermique par la méthode nodale: Ses principes, ses succès et ses limites ». Rev. Gén. Therm. Fr, 280, 363-372 (1985).
- [40] J.B. Saulnier, A. Alexandre, « La modélisation thermique par la méthode nodale: Ses principes, ses succès et ses limites ». Rev. Gén. Therm. Fr, 280, 363-372 (1985).
- [41] A. Guedira , A. Benallou, « Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc » Revue des Energies Renouvelables, JITH, P. 79-81, (2001).
- [42] M.L. BEN GUEHZA « impact de l'espace entre les deux vitrages sur le rendement d'un capteur solaire » mémoire de magister, Université de KASDI Merbah Ouargla, (2009)
- [43] H. Stéphane, « Etude numérique et expérimentale du transfert thermique dans une fenêtre » Thèse de doctorat, université de Montréal, (2001).
- [44] S. Bahia, M. Amirat « Influence de l'adjonction des chicane longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air » Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°1, 51 – 63, (2013).
- [45] <http://dateandtime.info>
- [46] A. AMICHE et al « Modélisation d'un capteur solaire thermique plan à eau doté d'un système d'ombrage automatique » 13ème Congrès de Mécanique 11 – (Meknès, MAROC) 14 Avril (2017).
-

Résumé

Le soleil fournit à la terre de gigantesques quantités d'énergie qui peuvent être exploitée sous des formes diverses. Dans le présent mémoire, l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan à eau a été étudiée.

Pour répondre à cette nécessité, nous avons étudié le comportement thermique d'un capteur solaire plan à eau en régimes instationnaire, en développant un programme de calcul. La résolution du système d'équations obtenu est abordée par une approche numérique, la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Les résultats que nous avons obtenus ont permis de préciser l'effet des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur, et de mettre en évidence l'effet prédominant de l'éclairement énergétique.

Mots clé : capteur solaire, modélisation, éclairement solaire, convection forcée. Rendement

المخلص

توفر الشمس للأرض كميات هائلة من الطاقة التي يمكن استغلالها بأشكال مختلفة. في هذه المذكرة، تم دراسة استغلال الطاقة الشمسية الحرارية باستخدام جهاز تجميع الطاقة الشمسية المسطح.

لتلبية هذه الحاجة، قمنا بدراسة السلوك الحراري لمجمع الطاقة الشمسية المسطحة في حالات غير مستقرة، من خلال تطوير برنامج حساب. يتم التوصل إلى حل نظام المعادلات التي تم الحصول عليها من خلال منهج رقمي.

جعلت النتائج التي حصلنا عليها من الممكن تحديد تأثير المعلمات الداخلية والخارجية على الكفاءة الآنية للمستشعر، وتسلط الضوء على التأثير السائد للإشعاع.

الكلمات المفتاحية: تجميع الطاقة الشمسية، النمذجة، الإضاءة الشمسية، الحمل الحراري القسري. محصول