

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : **Génie Mécanique**

Option : **Energétique**

Intitulé de Mémoire :

**Analyse de comportement thermique instationnaire
d'un capteur solaire plan à air avec recirculation**

Présenté par :

BOUAZZA MOKHTAR

Soutenu publiquement le : 06/06/2017

Devant le jury :

Mr. Badaui abedelhamid		CU Naama	Président
Mr. Benameur Benamar	MAA	CU Naama	Encadreur
Mr. Kaid nourddine		CU Naama	Examineur

Année universitaire: 2016-2017

Dédicace

C'est avec une joie et un réel plaisir que je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents :

A mon très cher père :

Je ne peux pas exprimer l'amour, l'appréciation et le dévouement et le respect que je l'ai toujours été pour vous. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez fait pour moi, je remercie mon père.

A ma chère mère:

Ce qui est resté sur mes encouragements tout au long de la voie scolaire, on entend pour moi un symbole de bon et de patience par excellence, la source de compassion et un exemple de dévouement qui ont continué à me accompagner, prier pour moi Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Ne peuvent pas exprimer assez ce qu'ils méritent pour tous les sacrifices consentis par moi depuis ma naissance, pendant l'enfance et même à l'âge adulte.

« Allah vous gardes »

A ma très chère sœur : Amina.

A mes très chers frères:

Abedelghanie, Abedelnour, et Mohammed.

A ma très chère personne : Omar et Mohamed et tous mes amis et collègues qui sont toujours m'encouragés dans mes études, aucune dédicace ne pourra exprimer mon profond affection et respect.

Remerciement

Dans ce travail, je remercie mon encadreur **Mr. benameur benamar**, enseignant à Institut des Sciences et Technologie, Centre Universitaire Ahmed Salhi (CUN). J'ai particulièrement apprécié ses encouragements, ses conseils et la liberté qu'il m'a accordée dans la poursuite de ce mémoire. Je suis aussi très reconnaissant de m'avoir sensibilisé de l'importance de la communication scientifique.

Mes remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter de participer au jury.

A tous nos professeurs et les enseignants du département de Génie mécanique de Centre Universitaire Ahmed Salhi à Naâma (CUN).

Je remercie aussi tous personnes de près ou de loin qui ont aidés à la réalisation de ce travail.

Enfin, un très grand merci à toute ma familles et mes amis(e), notamment mes collègues à l'institut des Sciences et Technologies (spécialité énergétique).

Bouazza Mokhtar

Résumé

Le travail de ce mémoire porte sur l'analyse de comportement thermique de capteur solaire plan à air avec recirculation, en régime stationnaire et instationnaire en considérant le gisement solaire de Naama. Le capteur avec recirculation a été simulé et comparé avec deux configurations à un seul passage (02) (capteur simple et capteur avec cavité fermée). La méthode des différences finies a été utilisée pour discrétiser les termes temporels et les termes convectifs. La méthode de Newton-Raphson a été utilisée pour linéariser les systèmes d'équations des bilans des conservations.

Un programme en MATLAB a été élaboré et validé en régime stationnaire avec des résultats issus de la littérature. L'effet de recirculation d'air a été analysé dans le cas de régime stationnaire et instationnaire.

Mots clés: capteurs solaires plans, stationnaire, instationnaire, recirculation d'air, différence finies, algorithme de Newton-Raphson.

Abstract

The work of this thesis is about the analysis of steady/unsteady behavior of flat plate solar air heater with recycle, considering solar data of Naama. The collector with recycle was simulated and compared with two flat plate configurations (02) having one flow passage (simple collector, collector with closed cavity). The finite difference method was employed to discretize transient and convective terms. Newton-Raphson algorithm was used for the linearization of heat balance systems of equations.

A MATLAB code was written and validated in steady state conditions with precedent results of literature. The effect of air recycling was analyzed in steady/unsteady state conditions.

Key words: flat plate solar air heaters, steady, unsteady, air recycling, finite difference, Newton-Raphson algorithm.

ملخص

يتمحور موضوع المذكرة حول نمذجة بعض الملتقطات الشمسية الهوائية المستوية في نظام ثابت و متغير في الزمن مع استعمال قيمة إشعاع الشمس 700 كعينة للدراسة في النظام الثابت و استعمال قيمة إشعاع الشمس لمدينة النعام في النظام المتغير. هناك أربعة أشكال(ملتقط زجاجي بممر واحد أحادي التدفق أما الثاني فهو ملتقط بممرين ذو تدفق واحد من الأسفل الثالث هو ملتقط بممرين و تدفقين للهواء لكن في اتجاهين متعاكسين أي برجوع الهواء عبر الممر الآخر)تمت نمذجة ومحاكاة هذه الأشكال باستخدام طريقة الفوارق المنتهية لتجزئة المصطلح الزمني ومصطلح الحمل الحراري. وبالتالي، تطلب العمل اللجوء إلى خوارزمية نيوتن رافسون لحل نظام المعادلات غير الخطية لإنحفاظ الطاقة الحرارية. تمت مقارنة المنهج المستخدم والتحقق من النتائج التي تم الحصول عليها من النموذج العددي بالمقارنة مع البيانات التجريبية للباحثين السابقين الذين تعمقوا في هذا المجال. التأثير التحسيني للملتقط الشمسي بإعادة تدوير الهواء تمت محاكاته بنتائج مقبولة في النظامين الثابت و المتغير في المجال الزمني.

الكلمات المفتاحية: الملتقطات الشمسية الهوائية المستوية، ملتقط ذو تدفق واحد برجوع الهواء، نظام ثابت ، متغير في الزمن ، طريقة الفوارق المنتهية، خوارزمية نيوتن رافسون.

Nomenclature

A_c	Surface de capteur	$[m^2]$
L	Longueur de capteur solaire a air	$[m]$
W	Largeur du capteur solaire	$[m]$
t	Distance entre l'absorbeur et la vitre	$[m]$
t_2	Distance entre l'absorbeur et la vitre	$[m]$
D_h	Diamètre hydraulique	$[m^2]$
$D_{h1,h2}$	Diamètre hydraulique de passages 1 et 2	$[m^2]$
$h_{1,2,3,4}$	Coefficient de transfert de chaleur	$[W/K * m^2]$
h_r	Coefficient rayonnement de transfert de chaleur	$[W/K * m^2]$
h_r	Coefficient de transfert de chaleur par convection du vent	$[W/K * m^2]$
h_{nc}	Coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle	$[W/K * m^2]$
h_{rb}	Coefficient rayonnement entre l'ambiante et la plaque inferieur	$[W/K * m^2]$
h_{rs}	Coefficient rayonnement entre la surface supérieur et le ciel	$[W/K * m^2]$
H	Intensité incidente du rayonnement solaire	$[W/m^2]$
T_1	Température de vitrage	$[°C]$
$T_{f,1,2}$	Température des fluides 1 et 2	$[°C]$
T_2	Température d'absorbeur	$[°C]$
T_3	Température de plaque (bottom)	$[°C]$
T_{fe}	Température moyenne du fluide à l'entrée de section (T_{fi})	$[°C]$
T_{fs}	Température moyenne du fluide à la sortie de section(T_{fo})	$[°C]$
T_a	Température ambiante	$[°C]$
T_s	Température de la voute céleste	$[°C]$
V	Vitesse du vent	$[m/s]$
X	Distance le long du collecteur en direction de l'écoulement	$[m]$
K_b, X_b	L'épaisseur d'isolation	$[m]$
U_b	Coefficient de chaleur de perte de poids	$[m]$
f	Facteur de frictions	
U_t	Coefficient de chaleur de perte de poids	$[m]$

W_p	Travail de pompe	[J]
$T^{(i)}$	Vecteur des températures à l'itération i	
$T_{n+1}^{(i)}$	Vecteur des températures à l'itération i à l'instant n+1	
$\{R(T^{(i)})\}$	Vecteur résiduel dans le cas stationnaire	
$\{R(T_{n+1}^{(i)})\}$	Vecteur résiduel dans le cas instationnaire	
$[j_k(T^{(i)})]$	Matrice Jacobienne dans le cas stationnaire	
$[j_k(T_{n+1}^{(i)})]$	Matrice Jacobienne dans le cas instationnaire	

Nombres adimensionnels

Gr	Nombre de Grashoff
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Ra	Nombre de Rayleigh
Re	Nombre de Reynolds

Lettres grecques

α_1	Coefficient d'absorptivité de la vitre	
α_2	Coefficient d'absorptivité de l'absorbeur	
β	Angle d'inclinaison du capteur	[°]
δ	La déclinaison du soleil	[°]
ω	Angle horaire du soleil	[°]
ϵ_1	Emissivité de la surface supérieure du verre	
ϵ_2	Émissivité de la surface supérieure de l'absorbeur noir	
ϵ_3	Émissivité de la surface inférieure de l'absorbeur non peint	
ϵ_4	Emissivité de surface de plaque inférieure	
τ	Coefficient de transmissivité du vitrage	
η	Le rendement : eff:effective/th:thermiqu/pm:pompe	

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur le rayonnement solaire et les capteurs solaires plans	3
I.1. Introduction :	4
I.2. Le concept du soleil et son importance :	4
I.2.1. Caractéristiques principales du soleil :	4
I.2.2. Structure du Soleil :	5
I.2.3. Evolution du soleil :	5
I.2.4. Mouvement de la terre autour soleil:	5
I.3. Caractéristiques de la terre :	6
I.4. L'atmosphère terrestre	6
I.5. Modèles de Calcule le gisement solaire :	6
I.5.1. Le gisement solaire ou le Rayonnement solaire :	7
<i>I.5.1.2 Constante solaire</i> :	7
<i>I.5.1.3 Rayonnement au voisinage du sol:</i>	7
I.6. Calcul de la position du soleil.....	8
I.6.1. Les coordonnées géographiques :	8
I.6.2. Les coordonnées célestes horizontales :	9
I.6.3 Les coordonnées célestes horaires :	10
<i>I.6.3.1 L'angle horaire (ω)</i> :	10
<i>I.6.3.2 La déclinaison (δ)</i> :	10
I.6.4. Le temps solaire :	11
<i>I.6.4.1. Temps solaire vrai</i> :	11
<i>I.6.4.2. Le temps solaire moyen (TSM)</i> :	11
I.7. Le gisement solaire en Algérie :	12
I.8. Le potentiel solaire en Algérie [21]:	12
I.9. Les Capteurs solaires :	13

I.9.1. Composantes d'un capteur solaire :	13
I.9.2. Les gammes de température et applications :	14
I.9.3 Différents types de capteurs solaires thermiques :	15
<i>I.9.3.1. Les capteurs plans non vitrés :</i>	15
<i>I.9.3.2. Les capteurs plans vitrés :</i>	16
<i>I.9.3.3. Les capteurs à tubes sous vide :</i>	16
<i>I.9.3.4. Le capteur parabolique et cylindro-parabolique :</i>	17
I.9.4. Les rendements du différent capteurs solaire :	18
Chapitre II : Recherche bibliographique	19
II.1. Introduction :	20
II.2. Le gisement solaire :	20
II.3. Les différents modèles sur les capteurs solaires :	20
II.4. Objectif de mémoire :	30
Chapitre III : Bilan énergétique et modélisation des capteurs plans à air	32
III.1. Introduction :	33
III.2. Description du problème :	33
III.3. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire :	33
III.3.1. Hypothèses simplificatrices:	34
III.3.2. Analyse théorique et schématisation :	34
III.3.3. Circuits électriques équivalents :	35
III.3.4. Bilans énergétiques :	37
<i>III.3.4.1. Capteur de type 1 :</i>	37
<i>III.3.4.2. Capteur de type 2 :</i>	37
<i>III.3.4.3. Capteur de type 3 :</i>	38
III.3.5. Méthode de discrétisation:	40
III.3.6. Les différents coefficients de transfert de chaleur :	42
III.3.7. Calcul de rayonnement solaire :	43
III.3.8. Les méthodes à suivre de résolution :	44
III.4. Algorithme de calcul et organigrammes :	47
Chapitre IV : Résultats, discussions et interprétations	50
IV.1. Introduction :	51

IV.2. Validation :	51
IV.3. Etude Paramétrique :	55
IV.3.1. Influence de débit massique :	56
IV.3.2. Influence de longueur de capteur :	59
IV.3.3. Influence de la profondeur de canal d'air :	63
IV.4. Régime instationnaire :	66
Conclusion générale	72

Introduction générale

Les applications de chauffage occupent une importance considérable dans tous les secteurs urbains et industriels. Ces applications nécessitent des quantités importantes de gaz naturel et des carburants pour garantir les températures désirées relatives à chaque application ; ce qui implique des prix énormes en terme de coût de consommation énergétique.

Le chauffage d'air est l'un des processus les plus coûteux au point de vue consommation dus à sa faible inertie thermique. Il est nécessaire pour réguler le confort thermique des habitats et le séchage des produits. Ces deux dernières applications occupent le plus grand pourcentage d'énergie orienté pour le chauffage.

L'utilisation de principe de conversion thermo-solaire pour produire la chaleur a connu un développement considérable dans les deux dernières décennies. Il a été appliqué dans des applications de petite échelle pour des besoins de chauffage, dont la température est inférieure à 100 °C à travers des capteurs solaires plan à air ou à eau ; et pour des applications de grande échelle au niveau des centrales thermo-solaires, afin de produire la vapeur surchauffée pour tourner les turbogénérateurs d'électricité, dont la température dépasse largement 100 °C, grâce à des systèmes de concentration (héliostats et concentrateurs cylindro-paraboliques).

Le capteur solaire plan est l'un des systèmes de conversion thermo-solaire les plus économiques dus à sa simple conception, son entretien facile, son intégrabilité dans l'habitat. Il permet d'obtenir des températures d'air ou d'eau inférieures à 100 °C.

Le présent mémoire porte sur l'étude de comportement de capteur solaire plan à air muni d'une recirculation en régime stationnaire et instationnaire, pour améliorer la température à la sortie et le comparer avec deux configurations à un seul passage. Un Programme de calcul a été élaboré en MATLAB et validé sur deux cas tests.

Nous avons articulé ce manuscrit autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente des notions générales sur le gisement solaire et le principe de conversion photo-thermique à travers les capteurs solaires plan.

- Le deuxième chapitre est consacré pour la recherche bibliographique concernant les travaux réalisés sur les capteurs solaires plans à air où il nous a permis d'obtenir les modèles mathématiques pour différents configuration.
- Dans le troisième chapitre, la formulation mathématique de comportement thermique de capteur avec recirculation basée sur les bilans de conservation, en régime stationnaire et instationnaire a été présentée. Une discrétisation des équations différentielles non-linéaires obtenue a été faite par la méthode des différences finis, ainsi que la linéarisation par la méthode de Newton-Raphson. Le programme de calcul élaboré en MATLAB a été expliqué aussi à l'aide d'un algorithme général et des organigrammes dans les deux cas stationnaire et instationnaire.
- Le quatrième chapitre présente une comparaison entre le capteur plan à air avec recirculation et deux (02) autres types à un seul passage (sans recirculation) en régime stationnaire et instationnaire. Le programme de calcul en régime stationnaire est validé avec des résultats issus de la littérature. Une étude paramétrique en prenant en considération l'effet de débit massique, la longueur de capteur, la profondeur de canal a été détaillée avec une représentation de température de sortie, rendement thermique, rendement effectif et perte de charge. Le comportement instationnaire de capteur avec recirculation est présenté et comparé avec deux autres configurations pour deux journées types (02) représentant l'automne et l'été.

Chapitre I

Généralité sur le rayonnement solaire et les capteurs solaires plans

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, On a commencé par une présentation de quelques notions fondamentales sur les cordonnées solaire. Une présentation des modèles utilisées pour le calcul des composantes des radiations solaires (direct, diffus et global) est faite. Le principe de conversion photo-thermique à la base de capteur solaire a été expliqué en détail. Le calcul de l'irradiation solaire a été présenté en considérant différentes inclinaisons en appliquant le modèle de LIU et JORDAN.

I.2. Le concept du soleil et son importance :

Le soleil est à l'origine de la vie sur terre et la perpétue par son apport incessant d'Énergie. Cette énergie nous arrive sous forme de rayonnement électromagnétique après avoir parcouru des millions de kilomètres. Notre étoile, est une véritable boule de feu, nous envoie à travers l'espace une énergie considérable qui n'est pas encore exploiter rentablement [3].

Le soleil est un générateur d'énergie interne et un distributeur pour les autres planètes d'un diamètre $1,39 \cdot 10^6$ Km. Il est situe a une distance de la terre de $149,59 \cdot 10^6$ Km. Compose de matières gazeuses, essentiellement de l'hydrogène 74 % et de l'hélium 25 %. le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus, et sa température de cœur atteint 10^7 K [2,5].

I.2.1. Caractéristiques principales du soleil :

Diamètre	1392000 (km)
Masse	$2 \cdot 10^{30}$ (kg)
Surface	$6,09 \cdot 10^{12}$ (km²)
Volume	$1,41 \cdot 10^{18}$ (km³)
Masse volumique moyenne	1408 (kg/m³)
Vitesse	217 (km/s)
Distance du centre de la voie lactée	$2,5 \cdot 10^{17}$ (km)

Tableau I.1. Caractéristiques principales du soleil.

I.2.2. Structure du Soleil :

Beaucoup d'entre nous croient que le soleil est une forme sphérique homogène, on peut distinguer plusieurs couches dans la structure interne :

Comme le montre la figure I-1 :

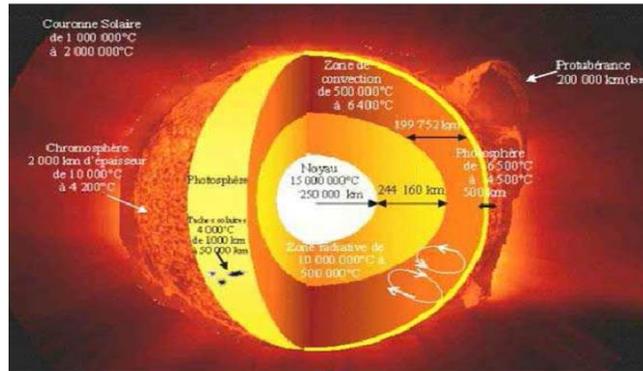


Figure I.1 : Structure du soleil en coupe [2]

I.2.3. Evolution du soleil :

Pendant les cinquante premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle [13].

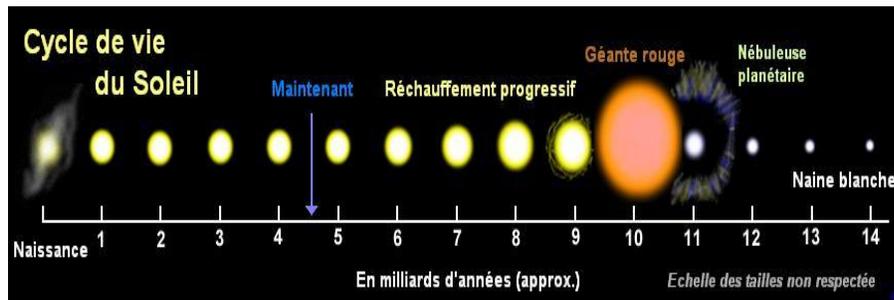


Figure I.2 : Cycle de vie du soleil.

I.2.4. Mouvement de la terre autour soleil:

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique (Figure I.4) :

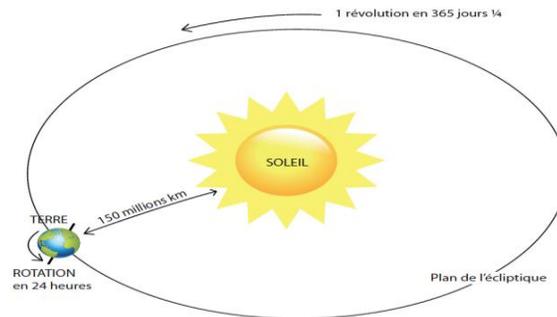


Figure I.3 : Trajectoire de la terre en rotation [18].

I.3. Caractéristiques de la terre :

Caractéristiques	Valeur
Masse	$6 \cdot 10^{21} \text{t}$
Surface	$510101 \cdot 10^3 \text{km}^2$
Volume	$1083320 \cdot 10^6 \text{km}^3$
Diamètre équatorial	$12756,32 \text{ km}$

Tableau I.2 : Caractéristiques principales de la terre.

I.4. L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches on distingue notamment :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère, entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère, entre 80 et 200 km d'altitude.

I.5. Modèles de Calcul le gisement solaire :

L'étude ou le calcul du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Pour cela il y a deux modèles semi empiriques :

- le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT qui emploie le facteur de trouble total de Linke très peu utilisé.

- le modèle de LIU JORDAN qui est à l'encontre du précédent le plus fréquemment employé.

Dans notre cas on utilise le modèle de LIU JORDAN mais avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, on donne certains principes de base et définitions des paramètres concernant l'énergie solaire.

I.5.1. Le gisement solaire ou le Rayonnement solaire :

Le gisement solaire représente l'énergie disponible sous forme de rayonnement se propage sous forme d'ondes électromagnétiques et c'est un apport énergétique disponible quotidiennement, dont l'intensité varie selon le lieu, l'heure et la date .L'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources naturelles d'énergie représentée par la constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère ($G \approx 1367 \text{ W/m}^2$) reçue par la terre, subit une altération par sa traversée de l'atmosphère, seulement une partie de cette énergie est disponible au sol [12].

I.5.1.2 Constante solaire :

L'énergie totale que le soleil envoie à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface de 1m^2 placée perpendiculairement au rayonnement est appelée "constante solaire ".Elles est fondamentale et indépendante des conditions météorologiques [12].

I.5.1.3 Rayonnement au voisinage du sol:

On est intéressé, du point de vue utilisation de l'énergie, par l'énergie reçue au voisinage du sol qu'à la limite de l'atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire arrivant au sol se compose de [3] plusieurs types :

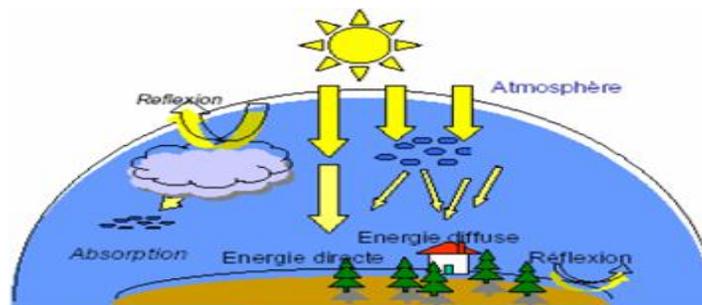


Figure I.4 : propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère terrestre.

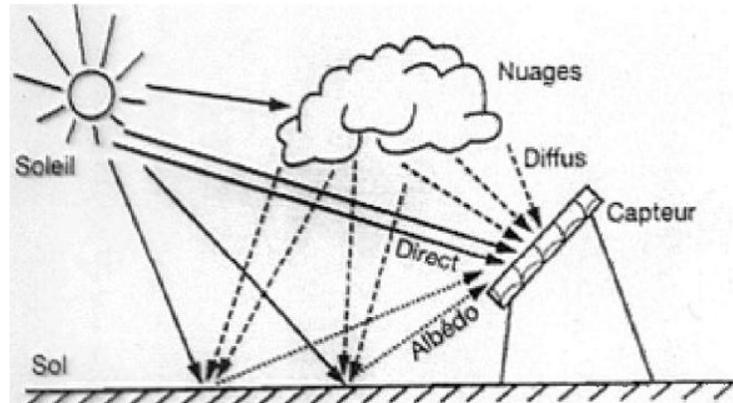


Figure I.5 : les différents types de rayonnements et l'Albédo.

- Rayonnement direct R_D : c'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

$$R_D = I * \sin(h) \quad \text{I-1}$$

- Rayonnement diffus R_d : est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Rayonnement global G : est la somme du rayonnement direct et diffus.

$$G = R_D + R_d \quad \text{I-2}$$

- L'albédo: C'est la fraction de l'énergie incidente diffusée par un corps lumineux, ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

On notera que 98 % du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à $4 \mu\text{m}$ et comme première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K.

I.6. Calcul de la position du soleil

I.6.1. Les coordonnées géographiques :

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques :

- La longitude (Lon) est l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu avec le méridien origine de Greenwich, elle varie de -180° à $+180^\circ$ de l'ouest à l'est.
- La latitude (Lat) est l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu, elle varie entre $+90^\circ$ au pôle Nord et -90° au pôle Sud.

Comme la montre la Figure I.6 :

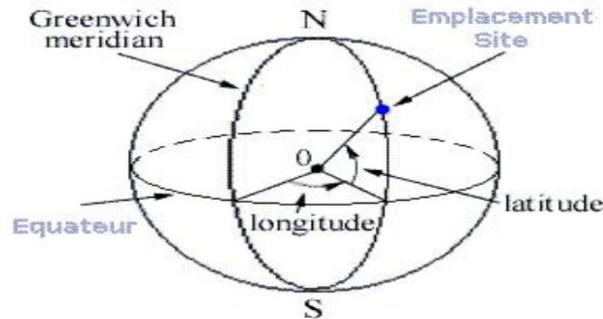


Figure I.6. : Les coordonnées géographiques terrestres [2].

La détermination de la direction du soleil sur la sphère céleste se fait par des coordonnées célestes du soleil qui sont :

I.6.2. Les coordonnées célestes horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [3]:

L'azimut (A) : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest. (Figure I.6). Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(A) = \cos(\delta) \times \frac{\sin(\omega)}{\sin(h)} \quad \text{I-3}$$

La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal (figure I.5), elle est donnée par la formule [2,3] :

$$\sin(h) = \sin(\Psi) \times \sin(\delta) + \cos(\Psi) \times \cos(\delta) \times \cos(\delta) \quad \text{I-4}$$

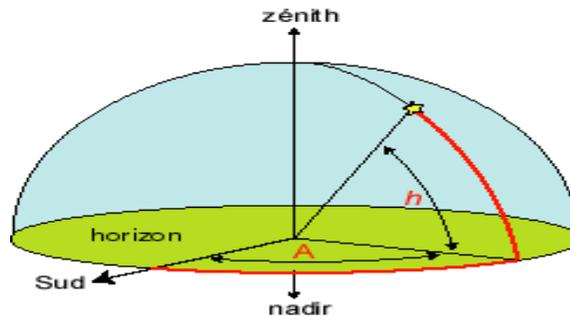


Figure I.7 : Les coordonnées célestes horizontales [5]

I.6.3 Les coordonnées célestes horaires :

I.6.3.1 L'angle horaire (ω) :

C'est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de 15° par heure [10], [2].

I.6.3.2 La déclinaison (δ) :

L'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre) [4]. Elle varie suivant l'équation de Cooper (comme le montre la Figure I.8) La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation:

$$\delta = 23.45^\circ \sin(0.980^\circ (n + 284)) \quad \text{I-5}$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année (c.-à-d. $n = 5$ pour le 5 janvier, $n = 36$ pour le 5 février... etc.).



Figure I.8 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

La variation de la déclinaison au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$:

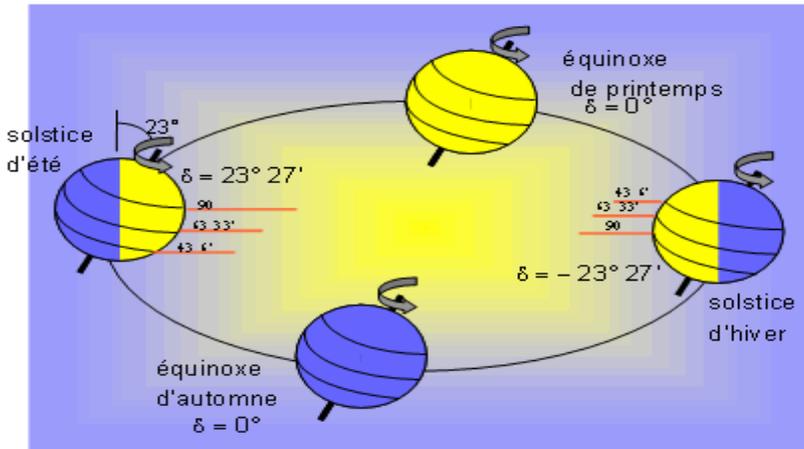


Figure I.9 : Variation annuelle de la déclinaison solaire.

I.6.4. Le temps solaire :

L'heure solaire : est l'heure qui basée sur le mouvement du soleil dans le ciel. Le midi solaire correspond au moment où le soleil est le plus haut dans le ciel, ce moment est généralement décalé par rapport au midi de l'heure légale :

I.6.4.1. Temps solaire vrai :

Le soleil tourne dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures, soit 15° par heure, il existe ainsi une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire ω :

$$\omega = 15 (TSV - 12) \tag{I-6}$$

Donc :
$$TSV = \frac{\omega}{15} + 12 \tag{I-7}$$

I.6.4.2. Le temps solaire moyen (TSM) :

Il est donné par [1]:

$$TSV - TSM = ET \tag{I-8}$$

ET : est l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM :

$$ET = 9,9 \sin[2(0,986n + 100)] - 7,7 \sin(0,986n - 2) \tag{I-9}$$

I.7. Le gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à latitude du lieu et orienté Sud, la distribution à grande échelle de sa moyenne annuelle est donnée par la figure ci-dessous [03] :

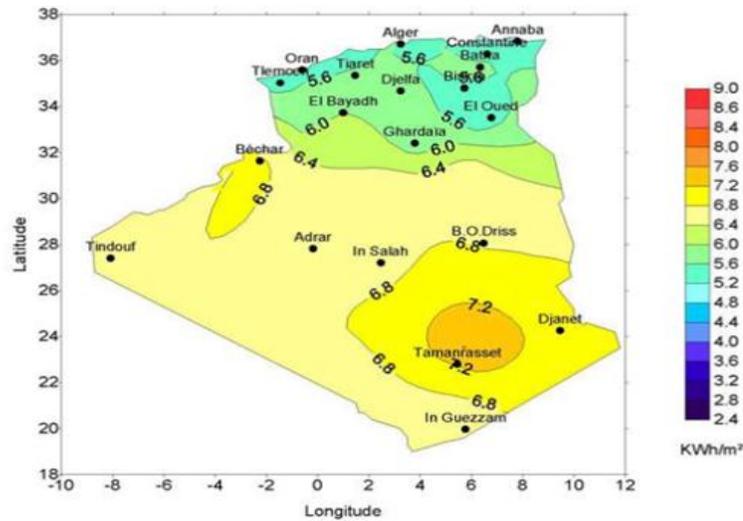


Figure I.10. Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [20].

I.8. Le potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède une source énergétique importante. Elle reçoit annuellement une énergie à l'ordre de 2200(KWh /m2/ an) comme valeur moyenne si on prend compte les trois régions d'Algérie:

Régions	Régions côtières	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'enseillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau I.3 : Potentiel solaire en Algérie [21].

I.9. Les Capteurs solaires :

Les capteurs solaires thermiques sont des dispositifs destinés à transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la (Figure I.9) :

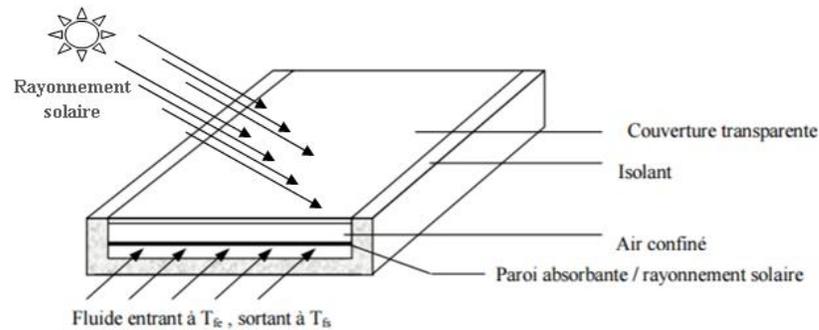


Figure I.11 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

I.9.1. Composantes d'un capteur solaire :

Un capteur solaire plan comme la montre la Figure I.11 précédente, il est essentiellement constitué d'une:

- *Une couverture transparente* : généralement en verre simple ou double. destinée à réduire les pertes vers l'avant de l'absorbeur par rayonnement (l'effet de serre).
- *Un fluide caloporteur* : donnant les calories absorbées vers l'utilisation directe ou de stockage.
- *L'absorbeur* : est le cœur du capteur solaire, car c'est précisément lui qui doit stocker la plus grande portion possible du rayonnement solaire qui lui parvient à travers le vitrage.

La figure I.12 montre principe de fonctionnement de collecteur solaire plan :

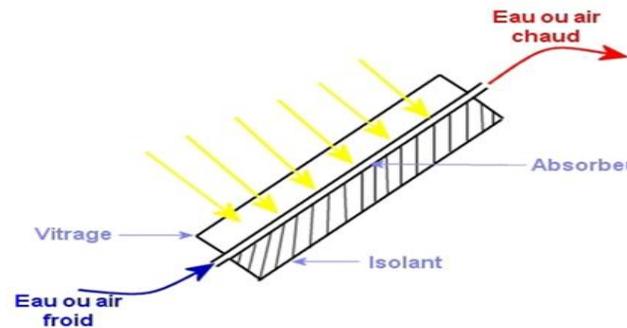


Figure I.12: capteur solaire thermique principe de fonctionnement



Figure I.13: Capteur solaire thermique vitré.

I.9.2. Les gammes de température et applications :

Les différentes gammes de température utilisées pour nombreuses applications sont les suivantes :

- *Température très basse* : 10 à 20 °C : Elle est utilisée pour le chauffage de l'eau domestique, la climatisation, la distillation, le séchage.
- *Moyennes Température*: 80 à 120 °C : C'est une gamme utilisée dans la production d'énergie mécanique et la réfrigération par absorption.
- *Très haute Température*: supérieur à 500 °C : Elle est utilisée dans la production de chaleur pour les transformations chimiques.

I.9.3 Différents types de capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires appartiennent à deux grandes familles ; ils sont soit :

- *Les capteurs plans non-concentrateurs* : à exposition directe qui peuvent être fixes ou mobile.
- *Les capteurs à concentrateurs* : à exposition indirecte qui sont généralement mobile.

Ces deux grandes familles peuvent être divisées en plusieurs types on distingue :

I.9.3.1. Les capteurs plans non vitrés :

Ils sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Son principe de fonctionnement est présenté sur la figure suivante :

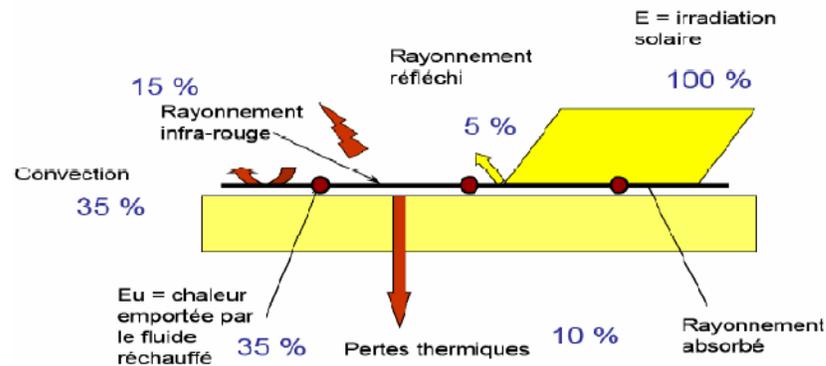


Figure I.14 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés [5].



Figure I.15 : capteurs plans non vitrés utilisés pour le chauffage de l'eau de piscine.

1.9.3.2. Les capteurs plans vitrés :

C'est un dispositif sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est une plaque métallique sensiblement plane et noircie pour absorber le maximum de rayonnement.

Elle est recouverte d'une vitre sur la face avant et isolée sur les faces latérales et arrière est généralement utilisé dans les installations de chauffage de l'eau sanitaire ou des locaux. La température de fonctionnement est généralement comprise entre 30°C et 60°C. Son principe de fonctionnement est présenté sur la figure suivante :

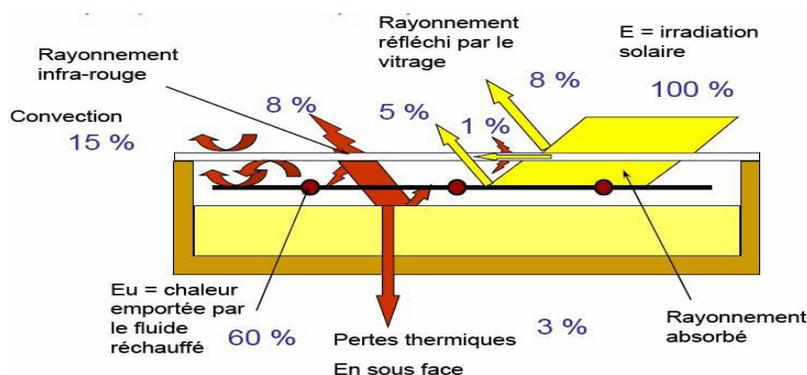


Figure I.16: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.



Figure I.17 : Capteurs plans vitrés intégrés à la toiture.

1.9.3.3. Les capteurs à tubes sous vide :

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique.

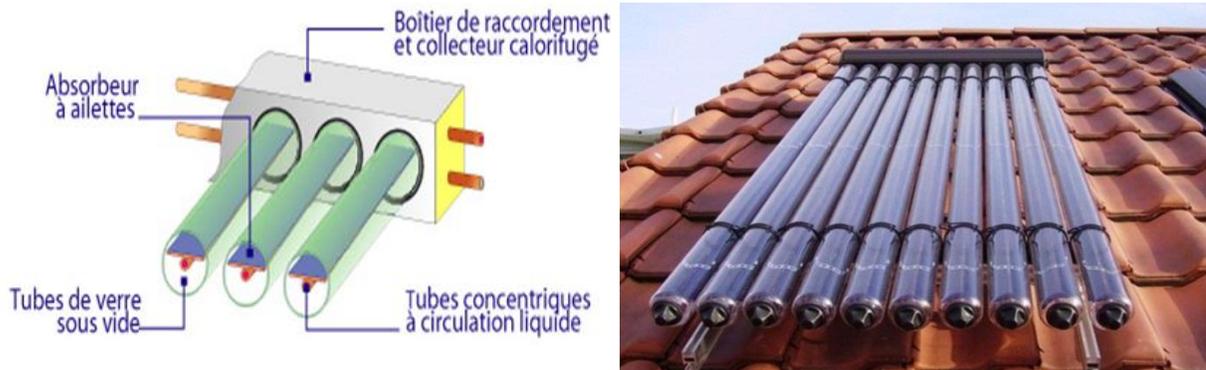


Figure I.18: un capteur à tube sous vide et une coupe transversale [5]

1.9.3.4. Le capteur parabolique et cylindro-parabolique :

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (figure I.17) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces .Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C.

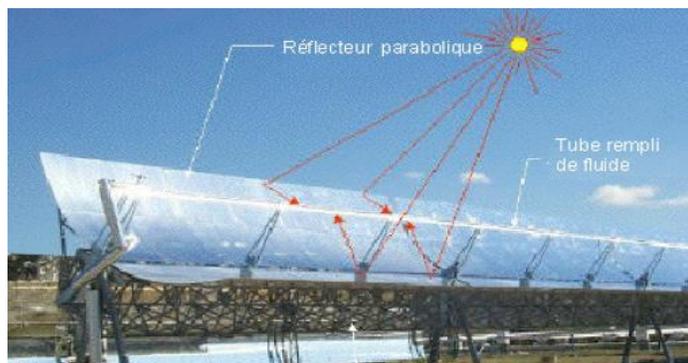


Figure I.19: un capteur cylindro-parabolique.

I.9.4. Les rendements du différents capteurs solaires :

Le rendement d'un capteur est le rapport entre la chaleur utile (Q_u) transmise au fluide et le rayonnement solaire incident (I_0) :

$$\eta = Q_u / I_0 \quad \text{I-10}$$

Où : Q_u : chaleur utile; I_0 : rayonnement solaire incident.

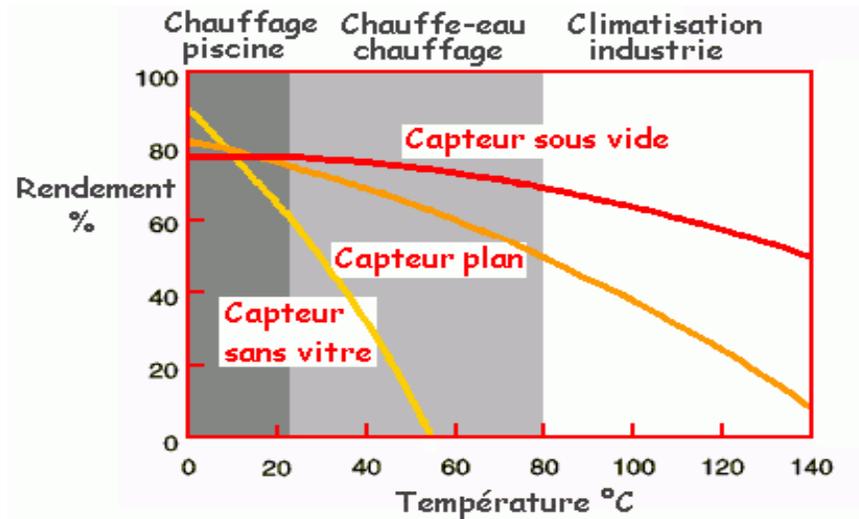


Figure I.20 : rendements de différents capteurs solaires

Chapitre II

Recherche bibliographique

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, Une analyse bibliographique des travaux publiés sur le rayonnement, les capteurs solaires plans à air et leurs différents modèles mathématiques a été effectuée, en analysant principalement les processus de transfert de chaleur des capteurs, les différentes configurations et ses conditions théoriques.

II.2. Le gisement solaire :

S. Benlahmidi [1] a fait une étude sur la valorisation du gisement solaire dans divers sites, de climats différents, par la réalisation d'un outil de simulation du rayonnement solaire, de la température ambiante et de la température de sortie d'un capteur solaire. Il permettra à tout utilisateur simple ou potentiel d'avoir des informations préalables avant d'entamer un projet solaire où il a trouvé des résultats concernant :

- La variation de température ambiante à partir l'heure du lever jusqu'à le coucher du soleil en temps solaire vrai (TSV).
- La variation de la température du fluide à la sortie du collecteur solaire comparée avec l'expérimentale.
- La variation du rayonnement global selon les deux modèles (Perrin de Brichambaut et Liu Jordan).

II.3. Les différents modèles sur les capteurs solaires :

Saadi Souad [2] a étudié l'effet des paramètres opérationnels internes et externes sur le rendement instantané du capteur solaire en régimes permanent et transitoire où elle a trouvé que les performances d'un capteur solaire plan varient en fonction de la température ambiante et en fonction de l'irradiation solaire.

Yves Jannot [3], a présentées des modèles liées aux coordonnées géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire et une partie théorique comporte l'étude des quatre types de capteur :

- *Capteur solaire couvert de type 1* : Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert s'appelle le type 1 peuvent être schématisés comme indiqué sur la figure II.5.

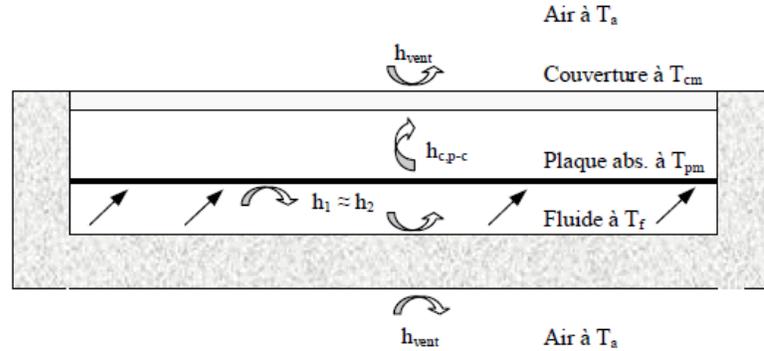


Figure II.1: Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert de type 1.

- *Capteur solaire couvert de type 2* :

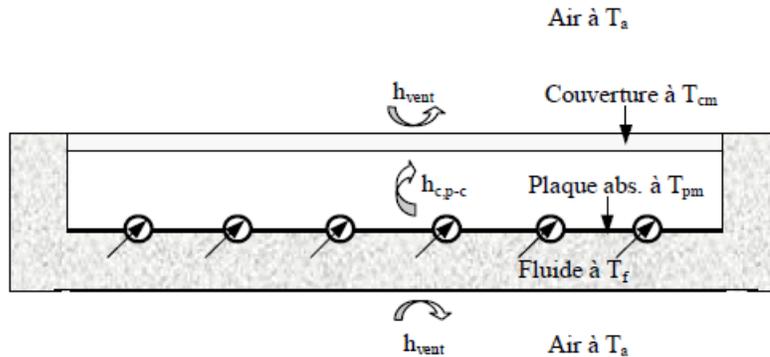


Figure II.2: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire couvert de type 2.

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} + (h_{c.p-c} + h_{r.p-c}) \frac{T_p - T_c}{T_p - T_a} \quad \text{II.1}$$

Dans le cas (verre) ou $\alpha_{cs} \approx 0$. On a :

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{c.p-c} + h_{r.p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r.c-a}}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad \text{II.2}$$

- Capteur solaire non-couvert de type 3 :

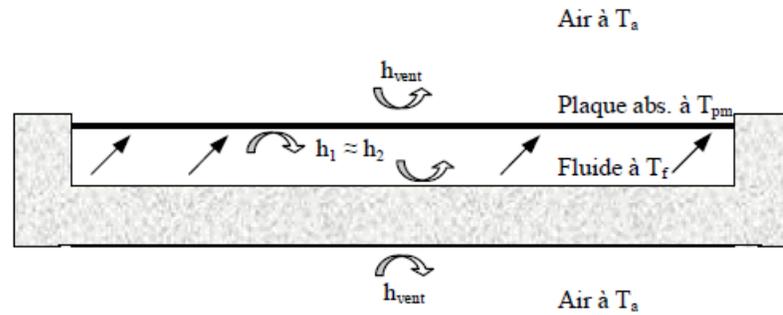


Figure II.3: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert de type 3.

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = h_{vent} + h_{r.a-c} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c.p-b} + h_{r.p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad \text{II.3}$$

- Capteur solaire non-couvert de type 4 :

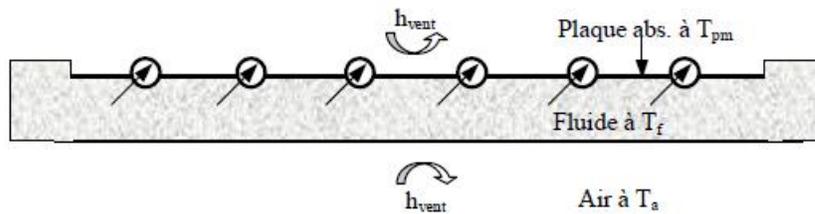


Figure II.4: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert de type 4.

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = h_{vent} + h_{r.a-p} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad \text{En } (W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}) \quad \text{II.4}$$

Sandali. M [4] a effectué une étude de l'effet de l'augmentation du débit massique sur les vitesses axiaux des particules fluide et sur le profil du coefficient de friction dans les deux canaux du capteur solaire. Une étude thermique a été réalisée aussi sur les effets de la

variation du rayonnement solaire, du débit massique en fonction de dimensions géométriques (l'épaisseur et la longueur de l'absorbeur, et la hauteur du canal inférieur) sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans et avec milieu poreux. La géométrie étudiée est comme suivant :

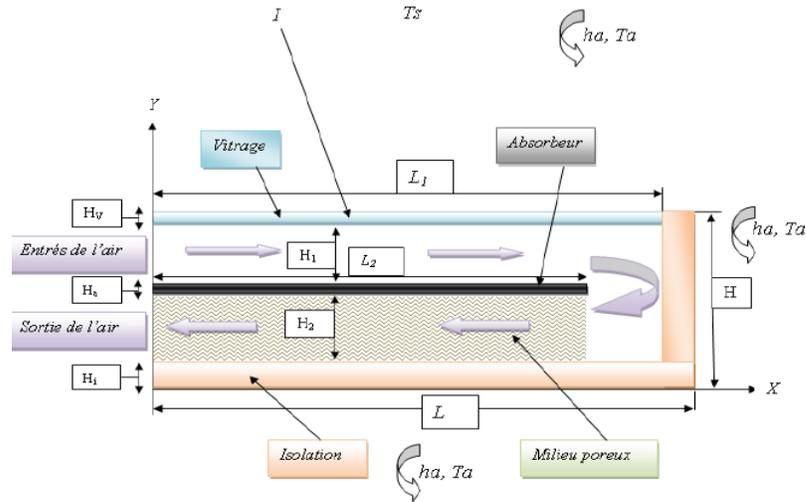


Figure II.5 : Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux.

Choudhury et al. [5] ont étudié la performance thermique d'un Capteur solaire plan à air non vitré (Figure II.6).

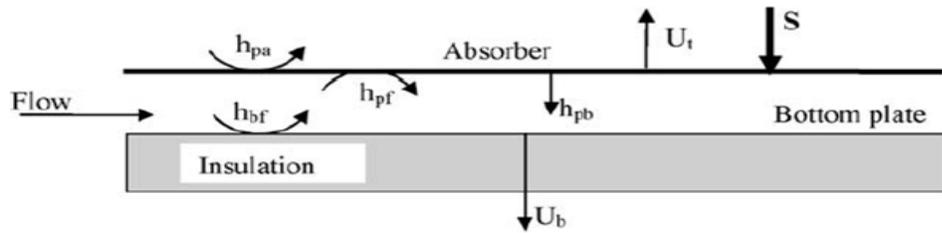


Figure II.6 : Capteur solaire plan à air non vitré

Les équations du bilan énergétique pour l'absorbeur et la plaque arrière sont comme suivantes :

$$\text{Pour l'absorbeur : } \alpha_p S = h_{pa}(T_p - T_a) + h_{pb}(T_p - T_b) + h_{pf}(T_p - T_f) \quad \text{II.5}$$

$$\text{Pour la plaque : } h_{pb}(T_p - T_b) = h_{pf}(T_p - T_f) + U_b(T_b - T_a) \quad \text{II.6}$$

Ong [6] a étudié le même modèle de Choudhury et al. [5] où il a fait un petit changement dans l'équation (II.21) de l'absorbeur où, h_{pa} est remplacé par : $U_b = h_w + h_{r,gs}$. Dans ce

modèle mathématique, le collecteur solaire a été supposé suffisamment court pour lequel les hypothèses étaient valides. La procédure de solution mathématique implique une inversion matricielle pour trouver le vecteur de température moyenne dérivé des équations énergétiques. Les températures prédites pour capteur plans solaires à d'air ont été présentées. Les effets des coefficients de transfert de chaleur, du vent et du film sur la prédiction ont été discutés.

Tchinda [7] a quantifié le transfert de chaleur dans un capteur solaire à air couplé avec un concentrateur CPC (la Figure II.7) à travers le modèle mathématique suivant :

Pour la vitre :

$$M_C M_{PC} \frac{\partial T_C}{\partial t} = I(t) \left[\bar{\alpha}_c + \bar{\alpha}_c \bar{\tau}_c \bar{\rho}_p \rho_m^{2(n)} \right] \frac{A_c}{A_p} + h_{RP}(T_P - T_C) + h_{P/C}(T_P - T_C) - h_{RS}(T_C - T_S) - h_{c/a}(T_C - T_b) \quad \text{II.7}$$

Pour l'absorbeur et pour $t > 0$:

$$M_p C_{PP} \frac{\partial T_p}{\partial t} = I(t) \bar{\tau}_c \rho_m^{2(n)} P \left[\bar{\alpha}_p + \bar{\alpha}_p \bar{\rho}_p \bar{\rho}_c \frac{A_p}{A_c} \right] \frac{A_c}{A_p} - h_{RP}(T_P - T_C) - h_{P/C}(T_P - T_C) - q_u(t) \quad \text{II.24}$$

Pour le fluide :

$$\rho_f e_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} = q_u(t) - \frac{m C_{pf}}{I_p} \frac{\partial T_f}{\partial X} - U_0(T_f - T_b) \quad \text{II.8}$$

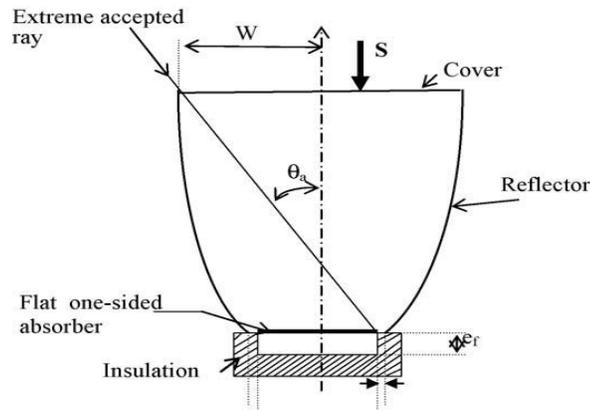


Figure II.7: Vue schématique d'un capteur solaire avec un concentrateur parabolique composé (Tchinda [7]).

Avec $t > 0$ et $0 < x < L$ où $p = 1 - g/I_p$, g est l'épaisseur de l'espace. $A_c = W * L$, $A_p = I_p * L$ et $q_u = U_f(T_p - T_f)$.

Njomo et Daguene [8] ont étudié la conception illustrée dans la figure II.6 avec des hypothèses générales. Ils ont optimisé les performances thermiques du capteur solaire plan en considérant différents paramètres de fonctionnement pour obtenir une performance thermique maximale. Les équations du bilan énergétique par chaque composant de capteur solaire ont été écrites comme suit:

Pour l'absorbeur :

$$M_P C_{PP} \frac{\partial T_P}{\partial t} = \alpha_p S - h_{rpb}(T_p - T_b) - h_{cpf}(T_p - T_f) - (h_{cpa} - h_{rpa})(T_p - T_a) \quad \text{II.9}$$

Pour le fluide :

$$\rho_f e_f C_{pf} \frac{\partial T_p}{\partial t} + \frac{m_f C_{pf}}{W} \frac{\partial T_p}{\partial x} = h_{cpf}(T_p - T_f) + h_{cbf}(T_b - T_f) \quad \text{II.10}$$

Pour la plaque isolant :

$$M_P C_{Pb} \frac{\partial T_b}{\partial t} = h_{rpb}(T_p - T_b) - h_{cbf}(T_b - T_f) - U_b(T_b - T_a) \quad \text{II.11}$$

Hegazy [9] a étudié le capteur vitré à un seul passage d'air (Figure II.8) en proposant un nouveau modèle mathématique.

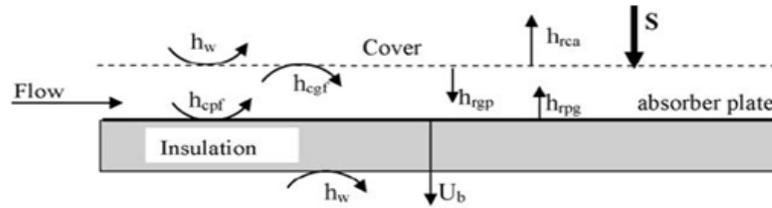


Figure II.8 : Capteur solaire plan à air vitré

Les équations du bilan énergétique ont été écrites comme suivant :

Pour le vitrage :

$$\alpha_g S = h_{rpg}(T_p - T_g) + h_{cgf}(T_{fm} - T_g) = (h_w + h_{rs})(T_g - T_a) \quad \text{II.12}$$

Pour le fluide :

$$h_{cpf}(T_p - T_{fm}) = h_{cgf}(T_{fm} - T_g) + 2GC_P \frac{(T_{fm} - T_{fi})}{(L/dx)} \quad \text{II.13}$$

Pour l'absorbeur :

$$\alpha_p \tau_g S = h_{cpf}(T_p - T_{fm}) + h_{rpg2}(T_p - T_g) + U_b(T_p - T_a) \quad \text{II.14}$$

Où : $T_{fm} = \left(\frac{T_{fo} + T_{fi}}{2} \right)$

G : est le taux spécifique de la masse.

Le calcul de rayonnement solaire et la température ambiante ont été représentées par série de Fourier.

Garg et al. [10] ont développé le modèle thermique pour étudier le capteur vitré à un seul passage d'air (Figure II.8) en régime transitoire. Ce modèle transitoire inclus les effets de capacité thermique et les pertes de conduction. Le bilan énergétique pour chaque composant du collecteur est comme suit:

Pour le vitrage :

$$\alpha_g S = M_g C_g \frac{\partial t_g}{\partial t} + K_g \delta_g \frac{\partial^2 t_g}{\partial X^2} + h_w (T_g - T_a) + h_{r_{gs}} (T_g - T_s) + h_{c_{gf}} (T_g - T_f) + h_{r_{pg}} (T_g - T_p) \quad \text{II.15}$$

Pour le fluide

$$M_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{G_f C_f}{W} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} = h_{c_{gf}} (T_f - T_g) + h_{c_{pf}} (T_p - T_f) \quad \text{II.16}$$

Pour l'absorbeur

$$\alpha_p \tau_p S = M_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} + K_p \delta_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial X^2} + h_{c_{pf}} (T_p - T_f) + h_{r_{pg}} (T_p - T_a) + U_r (T_p - T_a) \quad \text{II.17}$$

Ben guezha Mohammed Lakhdar [11] a étudié Capteur solaire plan à air à double vitrage pour voir l'impact de l'espace entre le vitre externe le vitre intermédiaire sur le rendement de capteur (Figure II.9). Il a utilisé la méthode des différences finis pour discrétiser les systèmes d'équations de l'énergie; La résolution du système est faite par la méthode itérative de Gauss-Seidel programmée en langage Fortran.

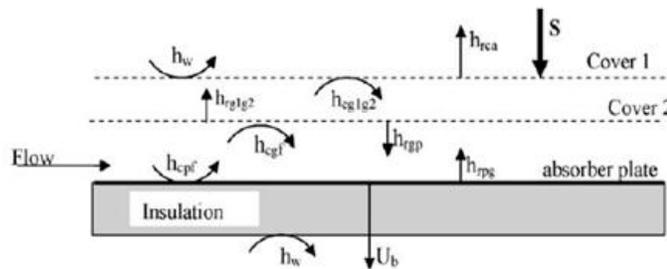


Figure II.9 : Capteur solaire plan à air à double vitrage

Mohamad [12] a étudié le transfert de chaleur dans ce dernier capteur (Figure II.9). Dans leur travail il a pris des conditions opérationnelles stables. Les équations des équilibres énergétiques sont comme suivantes :

Pour le vitrage supérieur :

$$\alpha_{g1}S = h_w(T_{g1} - T_a) + h_{cg1g2}(T_{g1} - T_{g2}) + h_{rg1g2}(T_{g1} - T_{g2}) \quad \text{II.18}$$

Pour le deuxième vitrage :

$$\begin{aligned} \alpha_{g2}\tau_{g1}S &= h_{cg2f}(T_{g2} - T_f) + h_{cg1g2}(T_{g2} - T_{g1}) + h_{rg1g2}(T_{g2} - T_{g1}) \\ &+ h_{rg2p}(T_{g2} - T_p) \end{aligned} \quad \text{II.19}$$

Pour le fluide :

$$mc_p \frac{dT_f}{dX} = h_{cg2f}(T_{g2} - T_f) + h_{cpf}(T_p - T_f) \quad \text{II.20}$$

Pour l'absorbeur :

$$\alpha_p\tau_{g1}\tau_{g2}S = h_{cpf}(T_p - T_f) + h_{rpg2}(T_p - T_{g2}) + U_b(T_p - T_a) \quad \text{II.21}$$

Yel et al. [13] ont étudié le transfert de chaleur dans un capteur solaire plan à air de double passe avec double vitrage (Figure II.10).

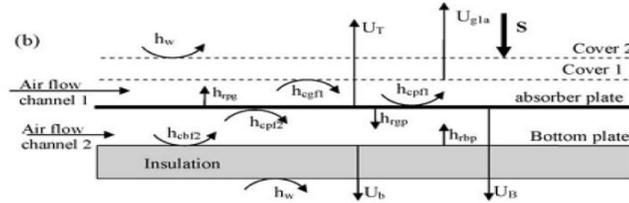


Figure II.10 : Capteur solaire plan à air de double passe avec double vitrage

Le modèle mathématique proposé par ces auteurs est comme suivant :

Pour la vitre intérieure :

$$h_{rpc1}(T_p - T_{g1}) + h_{cg1f1}(T_{f1} - T_{g1}) = U_{g1a}(T_{g1} - T_a) \quad \text{II.22}$$

Pour l'absorbeur :

$$\alpha_p\tau_g^2S = U_T(T_p - T_a) + U_B(T_p - T_a) + h_{CPF1}(T_p - T_{f1}) + h_{CPF2}(T_p - T_{f2}) \quad \text{II.23}$$

Pour la plaque de fond :

$$h_{cbf2}(T_{f2} - T_b) + h_{rpb}(T_p - T_b) = U_b(T_b - T_a) \quad \text{II.24}$$

Pour le fluide 1 :

$$rmC_f \frac{dT_{f1}}{dX} = Wh_{cpf1}(T_p - T_{f1}) + Wh_{cgf1}(T_g - T_{f1}) + h_{cf1g1}(T_{f1} - T_{g1}) \quad \text{II.25}$$

Pour le fluide 2 :

$$(1 - r)mC_f \frac{dT_{f1}}{dX} = Wh_{CPF2}(T_p - T_{f2}) + Wh_{cbf2}(T_b - T_{f2}) \quad \text{II.26}$$

F. Moukhtari et D. Semmar [14] ont effectué une étude expérimentale un capteur solaire plan à air. Ils ont donné la méthode de réalisation du modèle expérimental en se référant aux modèles standards des capteurs à air. Les paramètres mesurés permettent la validation de modèle théorique. Ils ont appliqué le capteur dans le séchage des produits agro-alimentaires. Wijeyesundera et al. [15] ont examiné analytiquement et expérimentalement un capteur solaire plan à air de double passe avec recirculation (Figure II.11).

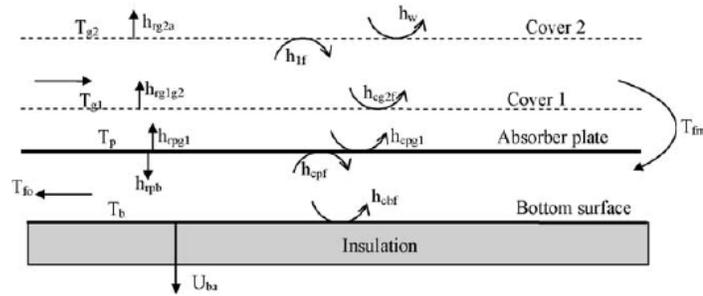


Figure II.11 : Capteur solaire plan à air de double passe avec recirculation.

Les équations d'énergies proposées sont comme suivantes :

Pour la vitre 1 :

$$Q_{f1} = A_C \lambda_1 S + A_C h_{rg2g1}(T_{g2} - T_{g1}) - A_C (h_{g1a} + h_w)(T_{g1} - T_a) \quad \text{II.27}$$

Pour la vitre 2 :

$$Q_{f2} = A_C \lambda_1 S + A_C h_{rg1g2}(T_{g2} - T_{g1}) + A_C (h_{rpg2} - h_{cpg2})(T_p - T_{g2}) \quad \text{II.28}$$

Pour l'absorbeur :

$$Q_{pf} = A_C \lambda_p S - A_C h_{rpb}(T_p - T_b) - A_C (h_{rpg2} - h_{cpg2})(T_p - T_{g2}) \quad \text{II.29}$$

Pour la plaque isolante :

$$Q_{bf} = A_C h_{rpb}(T_p - T_b) - A_C h_{cbf}(T_b - T_a) \quad \text{II.30}$$

Pour le fluide entre les vitres 1 et 2 :

$$Q_{f1} = A_C U_{21} \left[(T_2 - T_1) + F' (T_1 - T_{f1}) + F' \frac{h_{2f}}{h_{1f}} (T_2 - T_{f1}) \right] \quad \text{II.31}$$

Pour le fluide entre l'absorbeur et la plaque isolante :

$$Q_{f2} = A_C U_{21} \left[(T_{g2} - T_{g1}) + F' (T_{g1} - T_{f1}) + F' \frac{h_{cg1f}}{h_{cg2f}} (T_{g2} - T_{f1}) \right] \quad \text{II.32}$$

Avec :

$$F' = \frac{\dot{m}C}{(h_{cg2f} + h_{cg2f}) WL} [1 - \exp(-(h_{cg2f} + h_{cg2f}) WL / \dot{m}C)] \quad \text{II.33}$$

Q : est le flux de la chaleur totale et λ_i est la fraction du rayonnement solaire absorbé dans les différents éléments du collecteur.

Verma et al. [16] ont étudié le capteur solaire plan à air de double passe avec recirculation (Figure II.12).

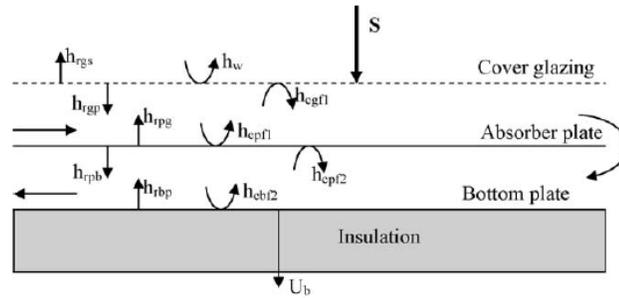


Figure II.12 : Capteur solaire plan à air de double passe avec recirculation.

Les équations proposées sont comme suivantes:

Pour la vitre :

$$\alpha_g S = h_{rgs} (T_g - T_s) + h_{cgf1} (T_g - T_{f1}) + h_w (T_g - T_a) + h_{rgp} (T_g - T_p) \quad \text{II.34}$$

Pour le fluide entre la vitre et l'absorbeur :

$$h_{cgf1} (T_g - T_{f1}) = h_{cf1p} (T_{f1} - T_p) + \frac{mC_f}{W} \frac{\partial T_{f1}}{\partial x} \quad \text{II.35}$$

Pour l'absorbeur :

$$\alpha_p \tau_g S + h_{rgp} (T_g - T_p) + h_{cf1p} (T_{f1} - T_p) = h_{cpf2} (T_p - T_{f2}) + h_{rpb} (T_p - T_b) \quad \text{II.36}$$

Pour le fluide entre l'absorbeur et la plaque arrière :

$$h_{cpf2} (T_p - T_{f2}) = h_{cf2b} (T_{f2} - T_b) + \frac{mC_f}{W} \frac{\partial T_{f2}}{\partial x} \quad \text{II.37}$$

Pour la plaque du fond :

$$h_{cf2b}(T_{f2} - T_b) + h_{rpb}(T_p - T_b) = U_b(T_b - T_a)$$

II.38

Les équations différentielles peuvent être résolues en utilisant les conditions aux limites suivantes:

$$T_{f1}|_{X=0} \quad \text{et} \quad T_{f1}|_{X=l} = T_f|_{X=L} \quad \text{II.39}$$

Baa. Yousef et Nm. Adam [17] ont étudié théoriquement l'effet du débit massique, du canal d'écoulement et de la longueur du collecteur sur la performance thermique d'un capteur solaire à air avec recirculation en présence et en absence d'un milieu poreux (Figure II.19). L'analyse des résultats à la même configuration et aux mêmes paramètres montre que l'efficacité thermique du système augmente de 10 à 12% en mode à double flux par rapport au capteur à un seul flux et augmente de 8% après utilisation d'un milieu poreux dans le canal inférieur en raison de l'augmentation de la zone de transfert de chaleur.

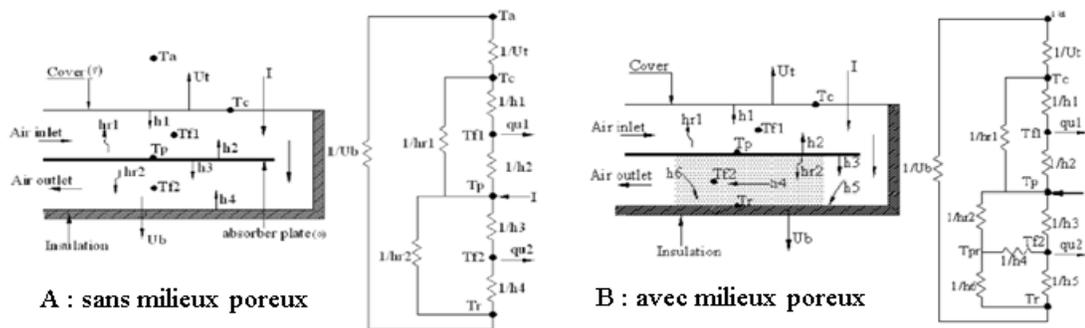


Figure II.13 : diagramme schématique des capteurs solaire à air avec recirculation et réseaux thermiques.

II.4. Objectif de mémoire :

L'objectif de ce mémoire est de développer un code en MATLAB qui nous permet d'analyser le comportement des capteurs plan solaires à air avec/sans recirculation en régime stationnaire/instationnaire en variant plusieurs paramètres de contrôle. Ce code nous permet de calculer :

- le rayonnement journalier en spécifiant l'endroit géographique et le jour de simulation.
- La température de sortie, le rendement thermique, le rendement effectif et les pertes de charge.

Chapitre III
Bilan énergétique
Et Modélisation des capteurs Plans à
Air

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, la modélisation de comportement thermique pour trois types des collecteurs solaires à air avec différentes en régime stationnaire/instationnaire. Un modèle mathématique non-linéaire basé sur les bilans de la conservation d'énergie a été établi. Une discrétisation des systèmes d'équations non linéaire avec différence finis a été présentée ainsi que la solution par la méthode de Newton-Raphson. La procédure de solution a été expliquée par un algorithme et des organigrammes pour élaborer un programme de calcul en régime stationnaire et instationnaire.

III.2. Description du problème :

Pour analyser le capteur à double passage avec recirculation d'air, nous avons pris deux autres types des capteurs solaires plans à un seul passage. Les trois capteurs sont classifiés comme suivant :

- Type 1 : capteur solaire plan vitré à un seul passage d'air.
- Type 2 : capteur solaire plan vitré à un seul passage muni d'une cavité supérieure fermée.
- Type 3 : capteur solaire plan vitré à double passage avec recirculation d'air où l'air entre dans la partie inférieure et sort par le passage supérieure.

III.3. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire :

Le principe de modélisation consiste à écrire les bilans énergétiques de chaque élément constituant le capteur : absorbeur, vitre, isolant et fluide caloporteur comme la montre la figure. III.1.

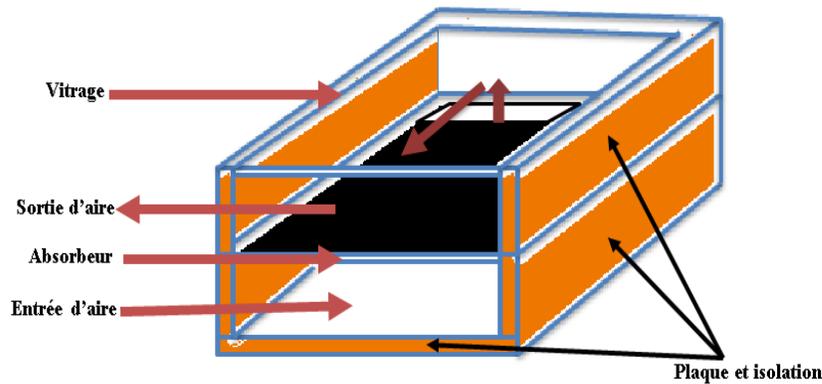


Figure III.1 : Collecteur solaire plan à air à double passage avec recirculation et ses composants.

Avant d'aborder la partie modélisation, il est nécessaire de considérer certaines hypothèses.

III.3.1. Hypothèses simplificatrices:

Pour modéliser les trois types des capteurs, on va considérer les hypothèses simplificatrices suivantes :

- le problème physique est considéré unidimensionnel.
- les pertes de chaleur à partir du bord du capteur solaire sont négligeables.
- La température de l'air varie dans la direction du flux.
- L'absorption du rayonnement par l'air est négligeable.
- les coefficients de transfert de chaleur par convection Air/vitre et Air/absorbeur sont considérés égaux.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur (air) varient en fonction de la température moyenne.
- La température ambiante est la même autour du capteur.

III.3.2. Analyse théorique et schématisation :

Les trois types des collecteurs mentionnés précédemment sont représentés dans la Figure III.3 et accompagnés avec les différents échanges thermiques en trois modes (convection, conduction, rayonnement). Leurs coefficients sont respectivement h , λ et h_r .

Les configurations des trois capteurs varient suivant le nombre de canal et le sens d'écoulement d'air.

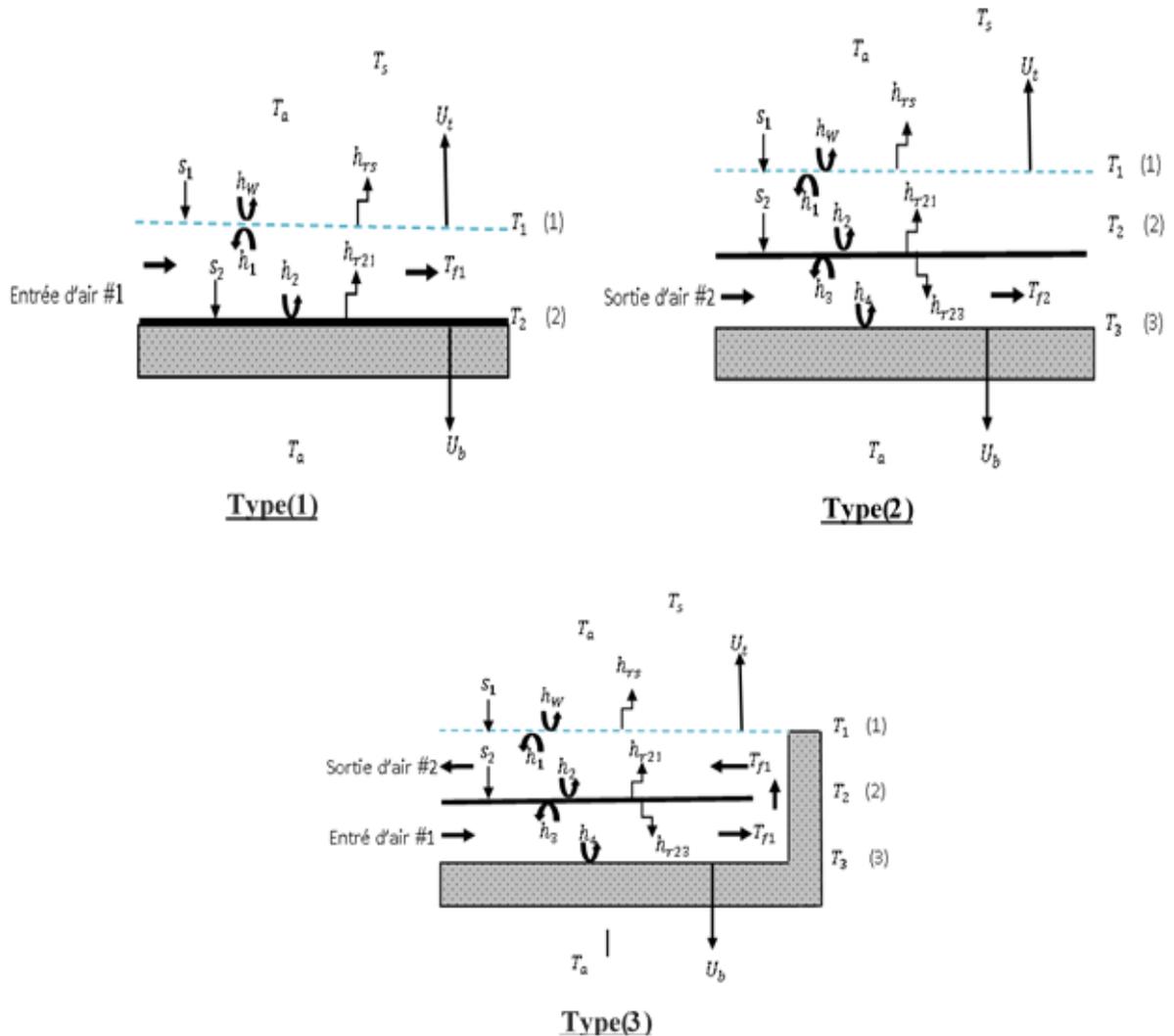


Figure III.2 : Les types des collecteurs solaires à air; Type (1), Type(2) et Type (3).

III.3.3. Circuits électriques équivalents :

Le mouvement de la chaleur à travers la matière est analogue au mouvement d'électricité, où on peut représenter chaque variable thermique par une variable électrique comme suivant :

- le flux de chaleur est représenté par le courant électrique
- la différence de température est représentée par la différence de potentiel électrique.
- les coefficients d'échange thermique sont représentés par des résistances électriques.
- la chaleur stockée est représentée par un condensateur électrique.

Les circuits électriques équivalents pour les trois types des capteurs solaires considérés sont représentés dans la figure III.3.

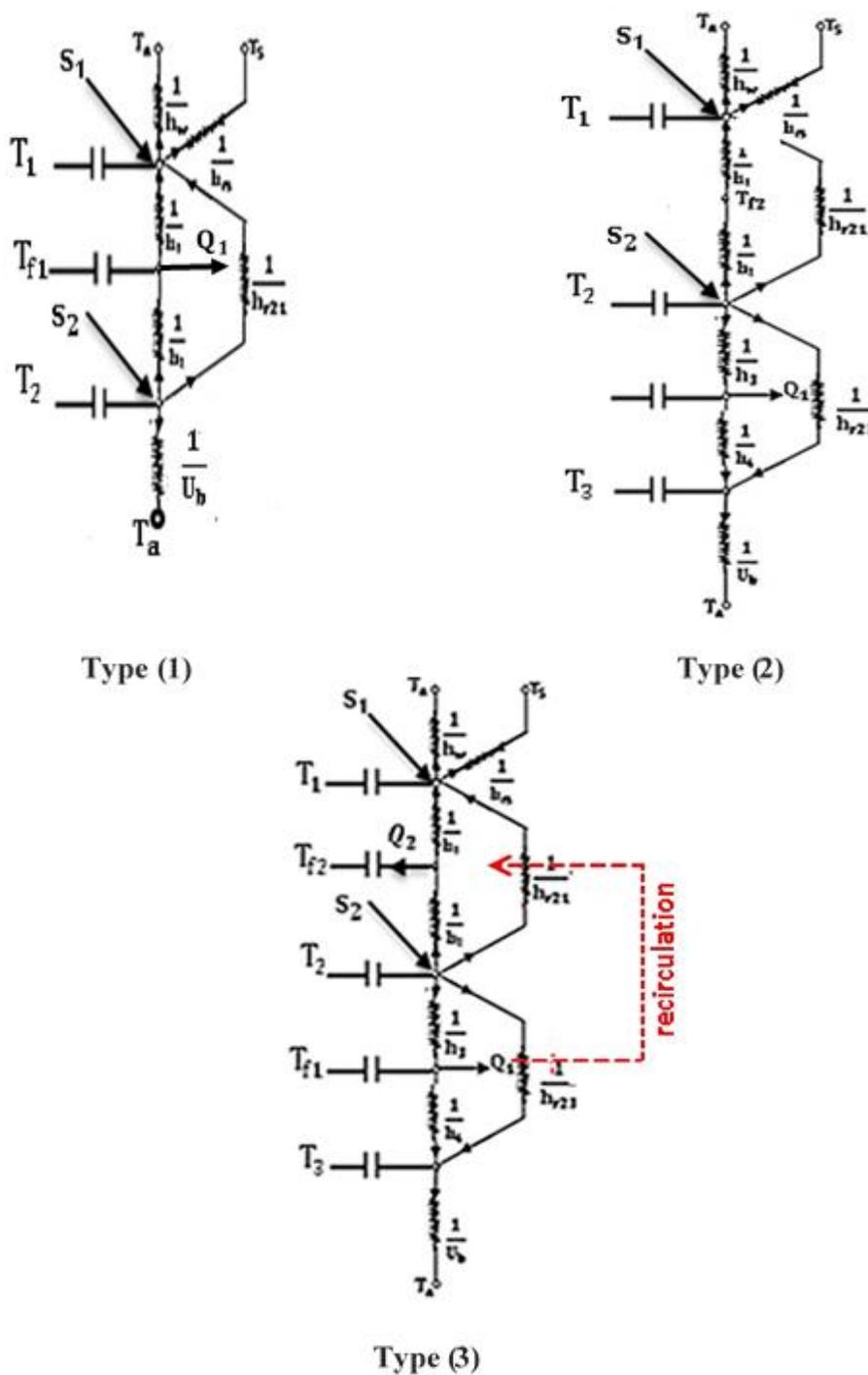


Figure III.3 : Circuits électriques équivalents pour les collecteurs solaires à air : (1), (2) et (3).

III.3.4. Bilans énergétiques :

Pour étudier le comportement thermique de chaque capteur, on repose sur les circuits électriques équivalents représentés dans la figure III.3 ; afin d'établir le bilan énergétique pour chaque composant de capteur (vitre, absorbeur, fluide, plaque isolant inférieur) en régime instationnaire.

Le bilan énergétique pour chaque composant s'écrit sous la forme suivante :

$$q_{st} = \sum q_e - \sum q_s + q_g \quad \text{III-1}$$

Où : q_{st} représente le flux de chaleur stocké au composant (nœud de circuit)

q_e représente le flux chaleur qui entre au composant.

q_s représente le flux chaleur qui sort de composant.

q_g représente la chaleur générée par composant.

On appliquant ce bilan pour chaque nœud de circuit et en négligeant les termes générés, on obtient les systèmes d'équation différentielle des trois capteurs comme suivants :

III.3.4.1. Capteur de type 1 :

Pour la vitre :

$$s_1(t) + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_{f1} - T_1) - U_t(T_1 - T_a) = \rho_1 e_1 C p_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad \text{III-2}$$

Pour le fluide 1 :

$$h_2(T_2 - T_{f1}) - h_1(T_{f1} - T_1) - Q_1 = \rho_{f1} e_{f1} C p_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} \quad \text{III-3}$$

Pour l'absorbeur :

$$s_2(t) - h_2(T_2 - T_{f1}) - h_{r21}(T_2 - T_1) - U_b(T_2 - T_a) = \rho_2 e_2 C p_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad \text{III-4}$$

III.3.4.2. Capteur de type 2 :

Pour la vitre :

$$s_1(t) + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_{nc}(T_2 - T_1) - U_t(T_1 - T_a) = \rho_1 e_1 C p_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad \text{III-5}$$

Pour l'absorbeur :

$$s_2(t) - h_3(T_2 - T_{f2}) - h_{nc}(T_2 - T_1) - h_{r23}(T_2 - T_3) - h_{r21}(T_2 - T_1) = \rho_2 e_2 C p_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad \text{III-6}$$

Pour le fluide 2 :

$$h_3(T_2 - T_{f2}) - h_4(T_{f2} - T_3) - Q_2 = \rho_{f2} e_{f2} C p_{f2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} \quad \text{III-7}$$

Pour la plaque :

$$h_4(T_{f2} - T_3) + h_{r23}(T_2 - T_3) - U_b(T_3 - T_a) = \rho_3 e_3 C p_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad \text{III-8}$$

III.3.4.3. Capteur de type 3 :

Pour la vitre :

$$s_1(t) + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_{f1} - T_1) - U_t(T_1 - T_a) = \rho_1 e_1 C p_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad \text{III-9}$$

Pour le fluide :

$$h_2(T_2 - T_{f1}) - h_1(T_{f1} - T_1) - Q_1 = \rho_{f1} e_{f1} C p_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} \quad \text{III-10}$$

Pour l'absorbeur :

$$s_2(t) - h_3(T_2 - T_{f2}) - h_2(T_2 - T_{f1}) - h_{r23}(T_2 - T_3) - h_{r21}(T_2 - T_1) = \rho_2 e_2 C p_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad \text{III-11}$$

Pour le fluide :

$$h_3(T_2 - T_{f2}) - h_4(T_{f2} - T_3) + Q_2 = \rho_{f2} e_{f2} C p_{f2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} \quad \text{III-12}$$

Pour la plaque :

$$h_4(T_{f2} - T_3) + h_{r23}(T_2 - T_3) - U_b(T_3 - T_a) = \rho_3 e_3 C p_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad \text{III-13}$$

Les conditions aux limites et initiales sont comme suivants :

Capteur de type 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{f1}(0, t) = T_a \\ T_1(x, 0) = T_a \\ T_{f1}(x, 0) = T_a \\ T_2(x, 0) = T_a \end{array} \right. \quad \text{III.14}$$

Capteur de type 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{f2}(0, t) = T_a \\ T_1(x, 0) = T_a \\ T_2(x, 0) = T_a \\ T_{f2}(x, 0) = T_a \\ T_3(x, 0) = T_a \end{array} \right. \quad \text{III.15}$$

Capteur de type 3 (recirculation) :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{f2}(0, t) = T_a \\ T_{f1}(L, t) = T_{f2}(L, t) \\ T_1(x, 0) = T_a \\ T_{f1}(x, 0) = T_a \\ T_2(x, 0) = T_a \\ T_{f2}(x, 0) = T_a \\ T_3(x, 0) = T_a \end{array} \right. \quad \text{III.16}$$

L'énergie thermique transportée dans une section élémentaire est représentée comme suite:

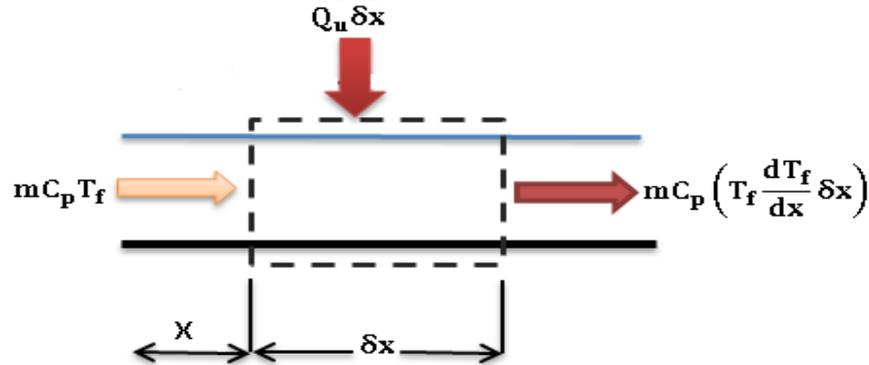


Figure III.4: Energie utile transportée dans une section élémentaire de capteur solaire.

La température du courant d'air à une distance x de l'entrée du collecteur est supposée être T_f . La température est supposée uniforme dans toute la section transversale. A la sortie de la section ($x + \delta_x$), la température moyenne de l'air est égale à $\left(T_f + \left(\frac{dT_f}{dx}\right) \delta_x\right)$. Le bilan thermique de l'élément est donc :

$$m C_p T_f + Q W \delta_x = m C_p \left(T_f + \frac{dT_f}{dx} \delta_x\right) \quad \text{III-17}$$

En simplifiant et en divisant par δ_x , on obtient :

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{Q W}{(m C_p)} \quad \text{III-18}$$

III.3.5. Méthode de discrétisation:

En supposant que la chaleur utile transférée à l'air est uniforme au long du collecteur de longueur L , on peut trouver la température moyenne de l'air à la sortie en intégrant l'équation (III-15) pour donner :

$$T_{fs} - T_{fe} = \frac{QWL}{mC_p} \quad \text{III-19}$$

Le gradient de la température de fluide dans un sous capteur de longueur dx peut être trouvée par la méthode différences finis comme suit :

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{\delta_x} = \frac{QW}{mC_p} \quad \text{III-20}$$

Avec : $T_f = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2}$ alors que :

$$T_{fs} = 2T_f - T_{fe} \quad \text{III-21}$$

En remplaçant l'équation III-18 dans l'équation III-17, on obtient la chaleur utile de fluide comme suite :

$$Q = \frac{2mC_p}{W\delta_x} (T_f - T_{fe}) \quad \text{III-22}$$

Considérons : $\Gamma_1 = \frac{2m_1C_p}{Wd_x}$ et $\Gamma_2 = \frac{2m_2C_p}{Wd_x}$; Alors les chaleurs Q_1 et Q_2 devient :

$$Q_1 = \Gamma_1 (T_{f1} - T_{f1e}) \quad \text{III-23}$$

$$Q_2 = \Gamma_2 (T_{f2} - T_{f2e}) \quad \text{III-24}$$

La discrétisation de terme temporel s'effectue par différence finis comme suit :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T - T_0}{\Delta t} \quad \text{III-25}$$

Où : T et T_0 représentent les températures à l'instant $n + 1$ et n .

En considérant le schéma implicite et en remplaçant les équations III-23 jusqu'à III-25 dans les systèmes d'équations non-linéaires III-2 jusqu'à III-13, on obtient les systèmes matriciels suivants :

Capteur de type I :

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{h}_{r21} + \mathbf{h}_1 + \mathbf{U}_t + \frac{\rho_1 e_1 C_{p1}}{\Delta t}) & -\mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_{r21} \\ \mathbf{h}_1 & -(\Gamma_1 + \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2 + \frac{\rho_{f1} e_{f1} C_{p f1}}{\Delta t}) & \mathbf{h}_2 \\ -\mathbf{h}_{r21} & -\mathbf{h}_2 & (\mathbf{h}_2 + \mathbf{h}_{r21} + \mathbf{U}_b + \frac{\rho_2 e_2 C_{p2}}{\Delta t}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_f \\ \mathbf{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1(t) + \mathbf{U}_t \mathbf{T}_a - \frac{\rho_1 e_1 C_{p1} \mathbf{T}_{10}}{\Delta t} \\ -\Gamma_1 \mathbf{T}_{f1e} + \frac{\rho_{f1} e_{f1} C_{p f1} \mathbf{T}_{f10}}{\Delta t} \\ \mathbf{S}_2(t) - \frac{\rho_2 e_2 C_{p2} \mathbf{T}_{20}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad \text{III-26}$$

Capteur de type 2 :

$$\begin{bmatrix} \left(h_{r21} + h_{nc} + U_t + \frac{\rho_1 e_1 C p_1}{\Delta t} \right) & (h_{r21} + h_{nc}) & 0 & 0 \\ -(h_{r21} + h_{nc}) & \left(h_{nc} + h_3 + h_{r21} + \frac{\rho_2 e_2 C p_2}{\Delta t} \right) & -h_3 & -h_{r23} \\ 0 & h_3 & -\left(\Gamma_2 + h_3 + h_4 + \frac{\rho_{f2} e_{f2} C p_{f2}}{\Delta t} \right) & h_4 \\ 0 & -h_{r23} & -h_4 & \left(h_{r23} + h_4 + U_b + \frac{\rho_3 e_3 C p_3}{\Delta t} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(t) + U_t T_a - \frac{\rho_1 e_1 C p_1 T_{10}}{\Delta t} \\ S_2(t) - \frac{\rho_2 e_2 C p_2 T_{20}}{\Delta t} \\ -\Gamma_2 T_{f2e} + \frac{\rho_{f2} e_{f2} C p_{f2} T_{f20}}{\Delta t} \\ U_b T_a - \frac{\rho_3 e_3 C p_3 T_{30}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad \text{III-27}$$

Capteur de type 3 (recirculation) :

$$\begin{bmatrix} \left(h_{r21} + h_1 + U_t + \frac{\rho_1 e_1 C p_1}{\Delta t} \right) & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 \\ h_1 & -\left(-\Gamma_1 + h_1 + h_2 + \frac{\rho_{f1} e_{f1} C p_{f1}}{\Delta t} \right) & h_2 & 0 & 0 \\ -h_{r21} & -h_2 & \left(h_2 + h_3 + h_{r21} + h_{r23} + \frac{\rho_2 e_2 C p_2}{\Delta t} \right) & -h_2 & -h_{r23} \\ 0 & 0 & h_3 & -\left(\Gamma_2 + h_3 + h_4 + \frac{\rho_{f2} e_{f2} C p_{f2}}{\Delta t} \right) & h_4 \\ 0 & 0 & -h_{r23} & -h_4 & \left(h_{r23} + h_4 + U_b + \frac{\rho_3 e_3 C p_3}{\Delta t} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(t) + U_t T_a - \frac{\rho_1 e_1 C p_1 T_{10}}{\Delta t} \\ +\Gamma_1 T_{f1e} + \frac{\rho_{f1} e_{f1} C p_{f1} T_{f10}}{\Delta t} \\ S_2(t) - \frac{\rho_2 e_2 C p_2 T_{20}}{\Delta t} \\ -\Gamma_2 T_{f2e} + \frac{\rho_{f2} e_{f2} C p_{f2} T_{f20}}{\Delta t} \\ U_b T_a - \frac{\rho_3 e_3 C p_3 T_{30}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad \text{III-28}$$

Dans le cas de régime stationnaire tous les termes, tous les termes relatives au régime instationnaire seront annuler. Les systèmes matriciels s'écrivent comme suivants :

Capteur de type 1:

$$\begin{bmatrix} (h_{r21} + h_1 + U_t) & -h_1 & h_{r21} \\ h_1 & -(\Gamma_1 + h_1 + h_2) & h_2 \\ -h_{r21} & -h_2 & (h_2 + h_{r21} + U_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_f \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + U_t T_a \\ -\Gamma_1 T_{f1e} \\ S_2 + U_b T_a \end{bmatrix} \quad \text{III-29}$$

Capteur de type 2 :

$$\begin{bmatrix} (h_{r21} + h_{nc} + U_t) & -(h_{r21} + h_{nc}) & 0 & 0 \\ -(h_{r21} + h_{nc}) & (h_{nc} + h_3 + h_{r21} + h_{r23}) & -h_3 & -h_{r23} \\ 0 & h_3 & -(\Gamma_2 + h_3 + h_4) & h_4 \\ 0 & -h_{r23} & -h_4 & (h_{r23} + h_4 + U_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + U_t T_a \\ S_2 \\ -\Gamma_2 T_{f2e} \\ U_b T_a \end{bmatrix} \quad \text{III-30}$$

Capteur de type 3 (recirculation) :

$$\begin{bmatrix} (h_{r21} + h_1 + U_t) & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 \\ h_1 & -(\Gamma_1 + h_1 + h_2) & h_2 & 0 & 0 \\ -h_{r21} & -h_2 & (h_2 + h_3 + h_{r21} + h_{r23}) & -h_2 & -h_{r23} \\ 0 & 0 & h_3 & -(\Gamma_2 + h_3 + h_4) & h_4 \\ 0 & 0 & -h_{r23} & -h_4 & (h_{r23} + h_4 + U_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + U_t T_a \\ +\Gamma_1 T_{f1e} \\ S_2 \\ -\Gamma_2 T_{f2e} \\ U_b T_a \end{bmatrix} \quad \text{III-31}$$

III.3.6. Les différents coefficients de transfert de chaleur :

Les corrélations utilisées pour calculer les coefficients de transfert de chaleur sont prises du travail d'Oong [6] et Mohammadi et autres [18].

Les corrélations de coefficient de transfert de chaleur par convection en régime laminaire : ($Re < 2300$), transitoire : ($2300 < Re < 6000$) et turbulent : ($Re > 6000$), sont respectivement comme suivant :

$$Nu = 5.4 + \frac{0.0019[RePr(D_h/L)]^{1.71}}{1+0.00563[RePr(D_h/L)]^{1.17}} \quad \text{III-32}$$

$$Nu = 0.116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \times \left[1 + (D_h/L)^{2/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \right] \quad \text{III-33}$$

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3} (D_h/L)^{0.55} \quad \text{III-34}$$

Avec :

$$Pr = C_p \mu / k \quad \text{III-35}$$

$$Re = m D_h \rho / \mu S_e \quad \text{III-36}$$

$$h = Nu k / D_h \quad \text{III-37}$$

Les coefficients de transfert de chaleur par rayonnement sont comme suivant :

$$h_{r21} = \sigma (T_1^2 - T_2^2) (T_1 - T_2) (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \quad \text{III-38}$$

$$h_{r23} = \sigma (T_3^2 - T_2^2) (T_3 - T_2) (1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_2 - 1) \quad \text{III-39}$$

Le coefficient des pertes de chaleur supérieur pour les trois types des capteurs solaires peut être obtenu respectivement à partir :

$$U_{t1} = h_w + h_{rs1} \quad \text{III-40}$$

$$U_{t2} = h_w + h_{rs2} \quad \text{III-41}$$

Avec

$$h_w = 5.7 + 3.8V_w \quad \text{III-42}$$

$$h_{rS1} = \sigma \varepsilon_1 (T_1^2 - T_s^2)(T_1 + T_s)(T_1 - T_s)/(T_1 - T_a) \quad \text{III-43}$$

$$h_{rS2} = \sigma \varepsilon_2 (T_2^2 - T_s^2)(T_2 + T_s)(T_2 - T_s)/(T_2 - T_a) \quad \text{III-44}$$

Le coefficient inférieur (de la plaque) des pertes de chaleur est indiqué par :

$$U_b = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\delta_{iso}/k_{iso})} + 1/h_w \quad \text{III-45}$$

Les propriétés physiques de l'air sont comme suites [7] :

- Viscosité dynamique : $\mu = [1.983 + 0.00184(T - 27)]10^{-5}$ III-46

- La masse volumique : $\rho = 1.1774 - 0.00359(T - 27)$ III-47

- Conductivité thermique : $k = 0.02624 + 0.0000758(T - 27)$ III-48

- La chaleur spécifique : $C_p = 1009$

- La viscosité dynamique d'eau :

$$\mu_w = [0.002(T - 273)^2 - 0.3389(T - 273) + 170199]10^{-4} \quad \text{III-49}$$

III.3.7. Calcul de rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire absorbé par la vitre et l'absorbeur sont respectivement :

$$s_1(t) = \alpha_1 H(t) \quad \text{III-50}$$

$$s_2(t) = \alpha_2 H(t) \quad \text{III-51}$$

$H(t)$: Représente le rayonnement journalier global net reçu par la surface du capteur où il est calculé comme suivant :

$$H(t) = H_{der}(t) + H_{dif}(t) + H_{ref}(t) \quad \text{III-52}$$

Le rendement thermique du capteur : $\eta = \frac{mC_p(T_{fs} + T_{fe})}{HA_c}$

Le rendement thermique du capteur : $\eta_{eff} = \frac{mC_p(T_{fs} + T_{fe}) - W_p/c_f}{HA_c}$ III-53

Où W_p : est le travail de la pompe : $W_p = m\Delta P / (\rho\eta_{pm})$ III-54

La perte de charge : $\Delta P = f \left(\frac{m^2}{\rho} \right) \left(\frac{L}{W} \right)^3$ III-55

Où :

$H_{der}(t)$: Le rayonnement direct

$H_{dif}(t)$: Le rayonnement diffus

$H_{ref}(t)$: Le rayonnement réfléchi par le sol.

Le rayonnement diffus est calculé en utilisant le modèle de Liu-Jordan.

III.3.8. Les méthodes à suivre de résolution :

On prend le système d'équations non-linéaires de capteur solaire à air avec recirculation à titre d'exemple dans le régime instationnaire, on peut l'écrire sous forme des équations résiduelles comme suivant:

$$\begin{cases} F_1(T_1, T_{f1}, T_2, T_{f2}, T_3) = 0 \\ F_2(T_1, T_{f1}, T_2, T_{f2}, T_3) = 0 \\ F_3(T_1, T_{f1}, T_2, T_{f2}, T_3) = 0 \\ F_4(T_1, T_{f1}, T_2, T_{f2}, T_3) = 0 \\ F_5(T_1, T_{f1}, T_2, T_{f2}, T_3) = 0 \end{cases} \quad \text{III-56}$$

$$F_1 = (h_1 + h_{r21} + U_t + (\rho_1 e_1 C p_1 / \Delta t)) T_1 - h_1 T_{f1} - h_{r21} T_2 - S_1 - U_t T_a - \frac{\rho_1 e_1 C p_1 T_{10}}{\Delta t}$$

$$F_2 = h_1 T_1 - (-\Gamma_1 + h_1 + h_2 + h_{st1}) T_{f1} + h_2 T_2 - \Gamma_1 T_{f1e} + h_{st1} T_{f10}$$

$$F_3 = -h_{r21} T_1 - h_2 T_{f1} + \left(h_2 + h_3 + h_{r21} + h_{r23} + \frac{\rho_2 e_2 C p_2}{\Delta t} \right) T_2 - h_2 T_{f2} - h_{r23} T_3 - S_2 - \frac{\rho_2 e_2 C p_2 T_{20}}{\Delta t}$$

$$F_4 = h_3 T_2 - (-\Gamma_2 + h_3 + h_4 + h_{st2}) T_{f2} + h_4 T_3 + \Gamma_2 T_{f2e} + h_{st2} T_{f20}$$

$$F_5 = -h_{r23} T_2 - h_4 T_{f2} + \left(h_{r23} + h_4 + U_b + \frac{\rho_3 e_3 C p_3}{\Delta t} \right) T_3 - U_b T_a - \frac{\rho_3 e_3 C p_3 T_{30}}{\Delta t}$$

$$\text{Avec : } h_{st1} = \frac{\rho_{f1} e_{f1} C p_{f1}}{\Delta t} \quad \text{et} \quad h_{st2} = \frac{\rho_{f2} e_{f2} C p_{f2}}{\Delta t}$$

En générale le système matriciel précédant s'écrit sous la forme suivant :

$$[A]\{T\} = [B]$$

Pour arriver à résoudre ce système d'équation non-linéaire on applique la méthode de Newton-Raphson comme suite :

$$[j_k(T^{(i)})]\{\Delta T\} = \{-R(T^{(i)})\} \quad \text{(III-57)}$$

$$\text{Où : } j_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial T_1} & \frac{\partial F_1}{\partial T_{f1}} & \frac{\partial F_1}{\partial T_2} & \frac{\partial F_1}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_1}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_2}{\partial T_1} & \frac{\partial F_2}{\partial T_{f1}} & \frac{\partial F_2}{\partial T_2} & \frac{\partial F_2}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_2}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_3}{\partial T_1} & \frac{\partial F_3}{\partial T_{f1}} & \frac{\partial F_3}{\partial T_2} & \frac{\partial F_3}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_3}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_4}{\partial T_1} & \frac{\partial F_4}{\partial T_{f1}} & \frac{\partial F_4}{\partial T_2} & \frac{\partial F_4}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_4}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_5}{\partial T_1} & \frac{\partial F_5}{\partial T_{f1}} & \frac{\partial F_5}{\partial T_2} & \frac{\partial F_5}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_5}{\partial T_3} \end{bmatrix} \quad (\text{III-58})$$

Le calcul des coefficients de la matrice jacobienne se fait par la méthode suivante :

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_1} = \left(\frac{\partial h_{r21}}{\partial T_1} + \frac{\partial U_t}{\partial T_1} \right) T_1 + (h_1 + h_{r21} + U_t + (\rho_1 e_1 C p_1 / \Delta t)) - \frac{\partial h_{r21}}{\partial T_1} T_2 - \frac{\partial U_t}{\partial T_1} T_a$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_{f1}} = \frac{\partial h_1}{\partial T_{f1}} T_1 - \frac{\partial h_1}{\partial T_{f1}} T_{f1} - h_1$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_2} = \frac{\partial h_{r21}}{\partial T_2} T_1 - \frac{\partial h_{r21}}{\partial T_2} T_2 - h_1$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_{f2}} = 0$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_3} = 0$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_1} = h_1 - \frac{\partial h_{st1}}{\partial T_1} T_{f1} + \frac{\partial h_{st1}}{\partial T_1} T_{f10}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_2}{\partial T_{f1}} = & \frac{\partial h_1}{\partial T_{f1}} T_1 - \left(\frac{\partial h_1}{\partial T_{f1}} + \frac{\partial h_2}{\partial T_{f1}} + \frac{\partial h_{st1}}{\partial T_{f1}} \right) T_{f1} - (-\Gamma_1 + h_1 + h_2 + h_{st1}) + \frac{\partial h_1}{\partial T_{f1}} T_2 - \Gamma_1 \frac{\partial T_{f1e}}{\partial T_{f1}} \\ & + \frac{\partial h_{st1}}{\partial T_{f1}} T_{f1e} + h_{st1} \frac{\partial T_{f1e}}{\partial T_{f1}} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_2} = h_2$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_{f2}} = 0$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_3} = 0$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_1} = -\frac{\partial h_{r21}}{\partial T_1} T_1 + h_{r21} + \frac{\partial h_{r21}}{\partial T_1} T_2$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_{f1}} = -\frac{\partial h_2}{\partial T_{f1}} T_{f1} - h_2 + \frac{\partial h_2}{\partial T_{f1}} T_2 - \frac{\partial h_2}{\partial T_{f1}} T_{f2}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_2} = -\frac{\partial h_{r21}}{\partial T_2} T_1 - \frac{\partial h_{r21}}{\partial T_2} T_2 - h_1 - \frac{\partial h_{r23}}{\partial T_2} T_3$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_{f2}} = \frac{\partial h_3}{\partial T_{f2}} T_2$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_3} = \frac{\partial h_{r23}}{\partial T_2} T_2 - \frac{\partial h_{r23}}{\partial T_2} T_3 - h_{r23}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial T_1} = 0$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial T_{f1}} = 0$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial T_2} = h_3$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_4}{\partial T_{f2}} = & \frac{\partial h_3}{\partial T_{f2}} T_2 - \left(\frac{\partial h_3}{\partial T_{f2}} + \frac{\partial h_4}{\partial T_{f2}} + \frac{\partial h_{st2}}{\partial T_{f2}} \right) T_{f2} + (\Gamma_2 + h_3 + h_4 + h_{st2}) + \frac{\partial h_4}{\partial T_{f2}} T_3 \frac{\partial h_{st2}}{\partial T_{f2}} T_{f2e} \\ & + h_{st2} \frac{\partial T_{f2e}}{\partial T_{f2}} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial T_3} = h_4$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial T_1} = 0$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial T_{f1}} = 0$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial T_2} = -\frac{\partial h_{r23}}{\partial T_2} T_2 - h_{r23} + \frac{\partial h_{r23}}{\partial T_2} T_3$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial T_{f2}} = -\frac{\partial h_4}{\partial T_{f2}} T_{f2} - h_4 + \frac{\partial h_4}{\partial T_{f2}} T_3$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial T_3} = -\frac{\partial h_{r23}}{\partial T_3} T_2 + \frac{\partial h_{r23}}{\partial T_3} T_3 + \frac{\partial U_b}{\partial T_3} T_3 - \frac{\partial U_b}{\partial T_3} T_a$$

On applique la même méthode par analogie pour les capteurs 1 et 2.

Le critère de convergence pour le calcul itératif avec la méthode de Newton-Raphson est à

l'ordre de : $|(T^{(i+1)}) - (T^{(i)})| < \varepsilon$

III.4. Algorithme de calcul et organigrammes :

Afin d'écrire notre programme de calcul en MATLAB, on a adopté un algorithme qui comporte les étapes suivantes (voir l'annexe) :

- Calcul de rayonnement solaire et la durée d'ensoleillement journaliers en spécifiant le numéro de jours et la position géographique de capteur.
- Discrétisation de la durée journalière de lever de soleil au coucher de soleil
- On divise le canal d'écoulement du capteur en nombre spécifique des sections élémentaires.
- Initialisation des températures chaque composant de capteur comme températures ambiantes au lever de soleil
- Calcul des différents coefficients de transfert de chaleur et leurs dérivés en fonction des températures initialisées.
- Linéarisation des systèmes matriciels par la méthode de Newton-Raphson où le problème sera résolu en renvoyant le résultat de chaque itération à la phase suivante, jusqu'à atteindre la condition d'arrêt pour obtenir la solution convergée.
- la température de la sortie de section élémentaire sera placée comme la température d'entrée pour la section suivante jusqu'à finir toutes les sections.
- La température longitudinale de chaque composant à l'instant actuelle de calcul sera utilisée pour calculer la température prochaine.

Cette procédure de calcul est répétée jusqu'à atteindre le coucher de soleil.

Le programme écrit peut être représenté en régime instationnaire par les deux organigrammes suivant:

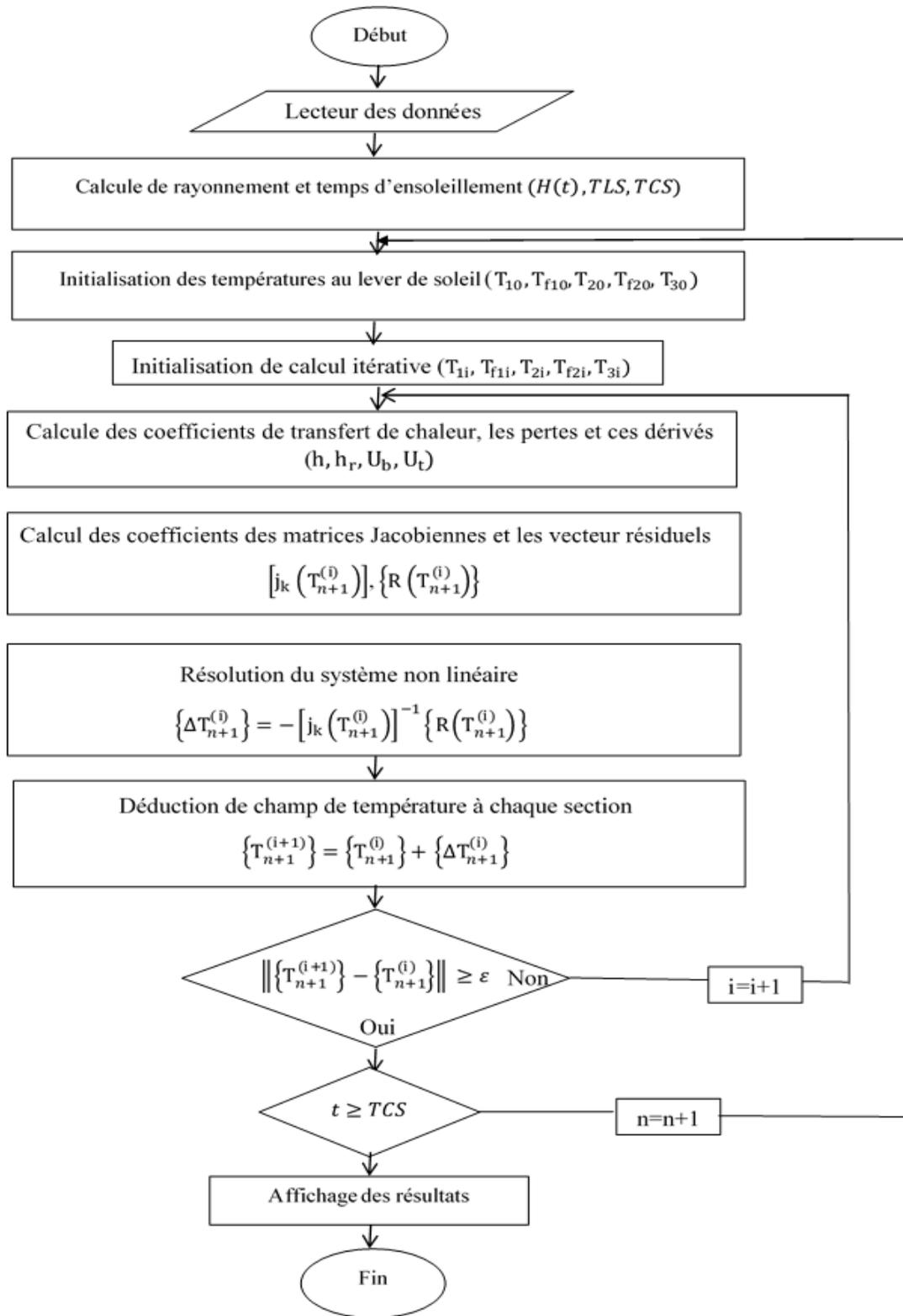


Figure III.5 : organigramme de calcul dans le cas de régime instationnaire

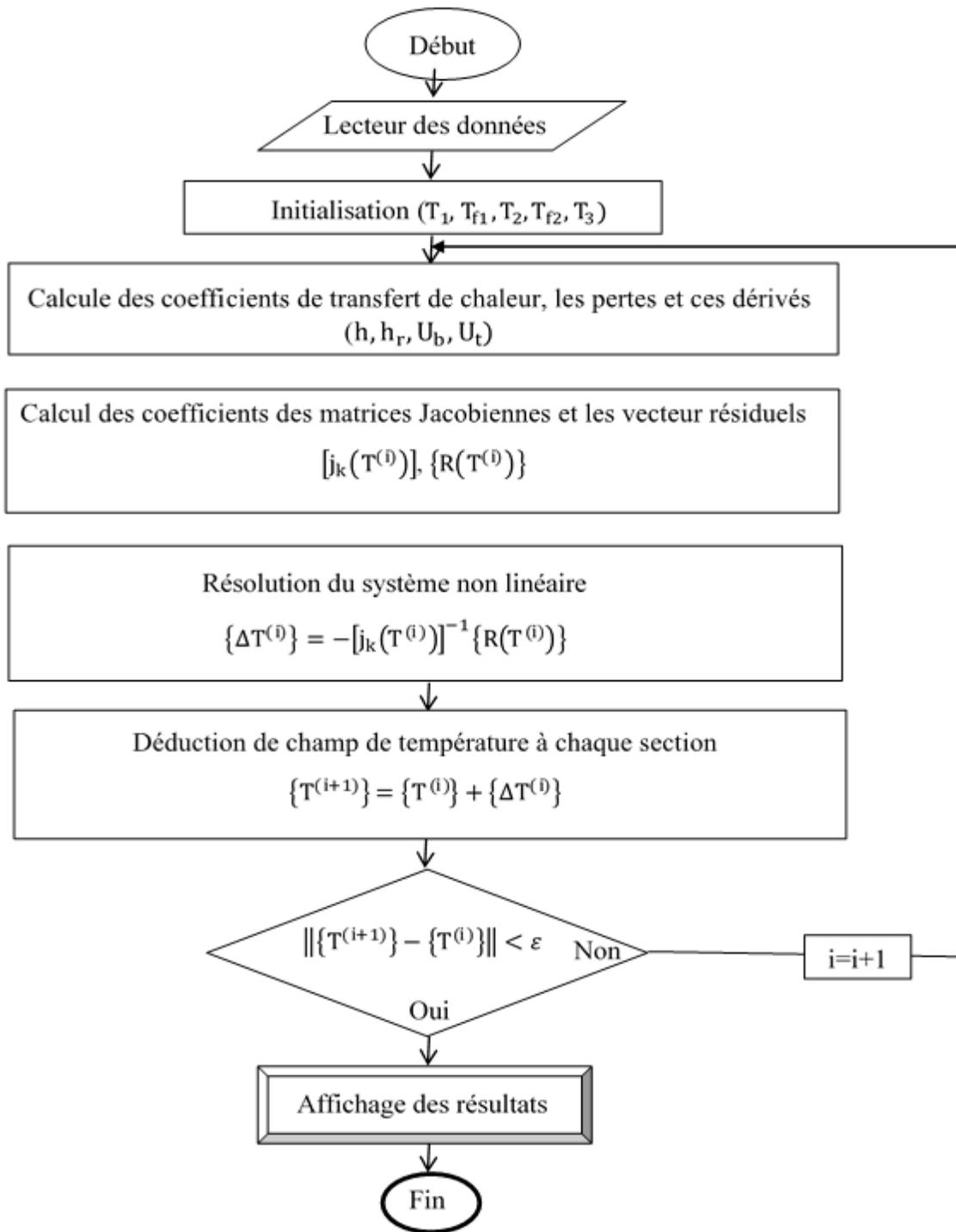


Figure III.6 : organigramme de calcul dans le cas de régime stationnaire

Chapitre IV
Résultats, discussions et
Interprétations

IV.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre, le comportement de capteur à air avec recirculation en régime stationnaire et instationnaire a été présenté et comparé avec deux capteurs à un seul passage. Une validation de programme de calcul avec des résultats issus de la littérature [7] a été faite. Une étude paramétrique a été effectuée en considérant l'effet du débit massique, l'effet de la longueur de capteur et l'effet de la profondeur de canal sur la température de sortie de fluide (air), la perte de charge, le rendement thermique et le rendement effectif du capteur. Les évolutions journalières de la température de sortie pour le capteur à double passage avec recirculation d'air ont été présentées et comparés avec les autres cas à un seul passage pour deux journées types.

IV.2. Validation :

Avant de passer à l'étude du capteur solaire plan à air avec recirculation, on a choisi de valider notre programme de calcul avec le travail d'Ong [7] dans le cas de régime stationnaire, pour deux configurations :

Capteur vitré simple à un seul passage (Type I)

Capteur à un seul passage couplé avec une cavité fermée (Type II)

Les paramètres optiques, et géométriques choisis par Ong [7] pour étudier les deux capteurs (Type I et II) sont présentées dans les deux tableaux suivants :

	vitre	absorbeur	Plaque isolant
α (Absorptivité)	0.06	0.95	/
ε (Emissivité)	0.9	0.95	0.25
τ (Transmittivité)	0.84	/	/

Tableau. IV.1 : Propriétés optiques des composantes des capteurs [7].

	L[m]	W[m]	t ₁ , t ₂ [m]	X _{b1} , X _{b2} [m]
Capteur 1	10	0.254	0.0254	0.025
Capteur 2	10	0.254	0.0254	0.025

Tableau. IV.2 : Propriétés géométriques des capteurs [7].

Les résultats sont obtenus et comparés pour une température ambiante $T_a = 27\text{ }^\circ\text{C}$, un nombre de Reynolds $Re = 4000$ et une température d'entrée d'air $T_{ef} = T_a$; avec un étalon de convergence $\varepsilon = 10^{-4}$. L'erreur en pourcentage par rapport aux résultats d'Ong est présentée dans les tableaux IV.3 jusqu'à IV.5.

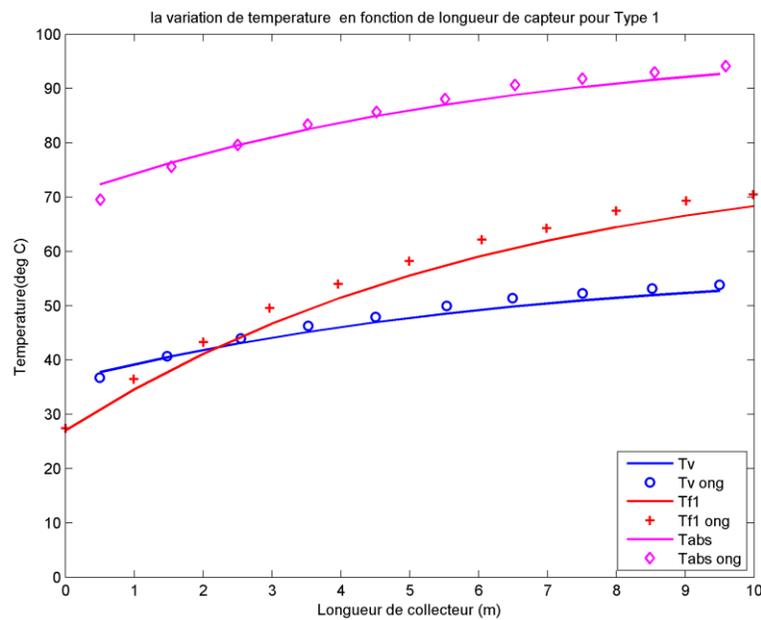


Figure IV.1 : Comparaison des résultats pour $Re = 4000$
 Capteur type I (T_1 , T_{f1} , T_2).

T1			Tf1			T2		
Nos Résultats	Ong	Erreur (%)	Nos Résultats	Ong	Erreur (%)	Nos Résultats	Ong	Erreur (%)
37.7563	36.7565	2.7200	27.0000	27.4011	1.4638	72.3467	69.4836	4.1205
40.5606	40.7148	0.3788	34.5981	36.5108	5.2388	76.2167	75.5869	0.8333
43.0025	43.9684	2.1969	41.1305	43.2786	4.9634	79.5574	79.5775	0.0253
45.1160	46.2875	2.5310	46.7267	49.5793	5.7535	82.4277	83.3333	1.0867
46.9360	47.9039	2.0204	51.5064	54.0056	4.6277	84.8846	85.6808	0.9293
48.4969	49.9875	2.9819	55.5780	58.1969	4.5001	86.9809	88.0282	1.1897
49.8309	51.3702	2.9964	59.0388	62.1535	5.0113	88.7650	90.6103	2.0365
50.9678	52.2832	2.5159	61.9749	64.2392	3.5248	90.2800	91.7840	1.6386
51.9344	53.1963	2.3722	64.4620	67.4942	4.4925	91.5643	92.9577	1.4990
52.7545	53.8760	2.0817	66.5659	69.3440	4.0063	92.6512	94.1315	1.5725
			68.3436	70.4921	3.0479			

Tableau. IV.3: Comparaison des résultats de notre modèle avec Ong pour le capteur 1 (T_1, T_{f1}, T_2).

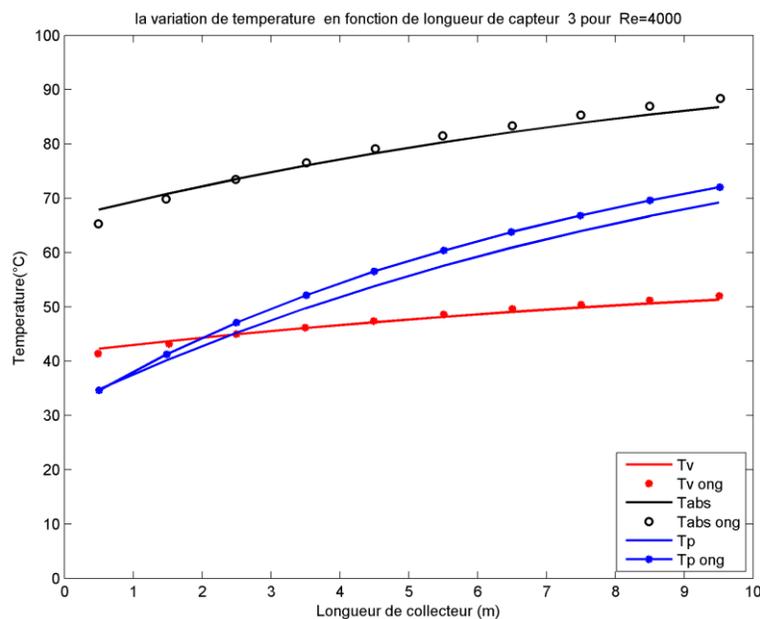


Figure IV.2 : Comparaison des résultats pour $Re = 4000$ Capteur type II (T_1, T_2, T_3).

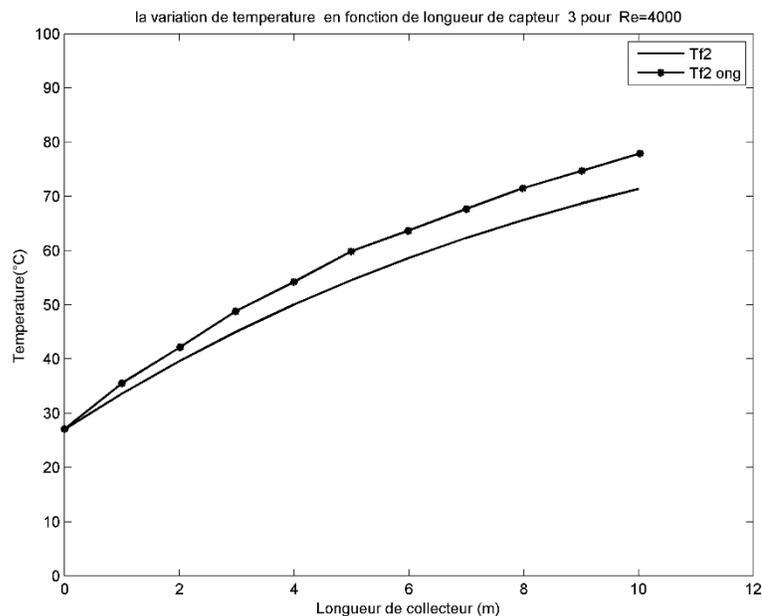


Figure IV.3 : Comparaison des résultats pour $Re = 4000$ capteur type II (T_{f2})

T1			T2		
Nos Résultats	Ong	Erreur (%)	Nos Résultats	Ong	Erreur (%)
42.3328	41.3655	2.3385	67.9091	65.2610	4.0577
43.6746	43.1727	1.1626	70.8324	69.8795	1.3636
44.9252	44.9799	0.1217	73.5229	73.4940	0.0393
46.0852	46.1847	0.2155	75.9907	76.5060	0.6735
47.1567	47.3896	0.4914	78.2475	79.1165	1.0984
48.1428	48.5944	0.9293	80.3058	81.5261	1.4969
49.0473	49.5984	1.1111	82.1785	83.3333	1.3858
49.8745	50.4016	1.0458	83.8789	85.3414	1.7137
50.6290	51.2048	1.1245	85.4199	86.9478	1.7573
51.3155	52.0080	1.3314	86.8141	88.3534	1.7422

Tableau. IV.4: Comparaison des résultats de notre modèle avec Ong pour le capteur 2 (T_1, T_2).

T1			T2		
Nos Résultats	Ong	Erreur (%)	Nos Résultats	Ong	Erreur (%)
42.3328	41.3655	2.3385	67.9091	65.2610	4.0577
43.6746	43.1727	1.1626	70.8324	69.8795	1.3636
44.9252	44.9799	0.1217	73.5229	73.4940	0.0393
46.0852	46.1847	0.2155	75.9907	76.5060	0.6735
47.1567	47.3896	0.4914	78.2475	79.1165	1.0984
48.1428	48.5944	0.9293	80.3058	81.5261	1.4969
49.0473	49.5984	1.1111	82.1785	83.3333	1.3858
49.8745	50.4016	1.0458	83.8789	85.3414	1.7137
50.6290	51.2048	1.1245	85.4199	86.9478	1.7573
51.3155	52.0080	1.3314	86.8141	88.3534	1.7422

Tableau. IV.5: Comparaison des résultats de notre modèle avec Ong pour le capteur 2 (T_{f2} , T_3).

Les figures IV.1, IV.2 et IV.3 montrent une comparaison entre les résultats obtenues en utilisant notre programme de calcul et les résultats d'Ong [7], où on remarque une très bonne concordance pour les deux capteurs 1 et 2 avec une erreur acceptable.

IV.3. Etude Paramétrique :

L'introduction de recirculation dans un capteur à air est souvent utilisée pour améliorer la température à la sortie. Une conception avec recirculation s'effectue à partir un cas à un seul passage. Pour montrer l'effet amélioratif de type avec recirculation, on a choisi trois paramètres de contrôle : débit massique, longueur de capteur, profondeur de canal d'air pour voir leurs influence en régime stationnaire sur la température de sortie, le rendement thermique, la perte de charge, le rendement effectif.

Les résultats obtenus sont comparés à chaque fois avec des capteurs de type 1 et 2 de la même Longueur (L) à travers des courbes et des tableaux. La température d'entrée d'air est considérée $T_{fe} = 27$ °C.

Les paramètres géométriques et optiques sont les mêmes utilisés dans la partie validation.

IV.3.1. Influence de débit massique :

Pour étudier l'influence de débit massique, on a choisis un intervalle $m_f = [0.001 - 0.1]$ qui correspond à un intervalle de Reynolds $Re = [361 - 36098]$ qui commence d'un régime laminaire et se termine par un régime pleinement turbulent. La longueur de capteur et la profondeur de canal sont respectivement $L = 2$ m et $t_1 = t_2 = 0.0254$ m.

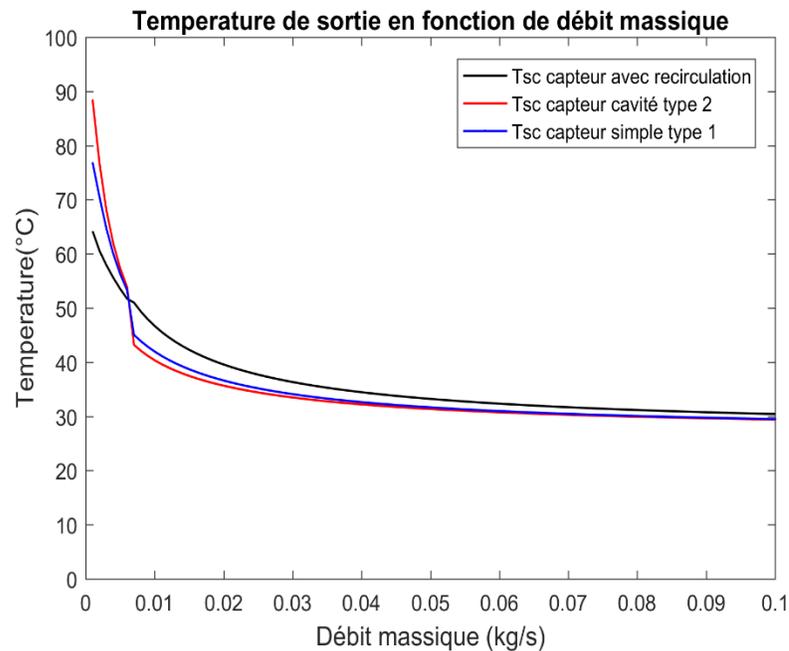


Figure IV.4 : Influence de débit massique (m_f) sur la température de sortie du fluide (T_f) pour les capteurs : I (simple), II (cavité), et III (recirculation).

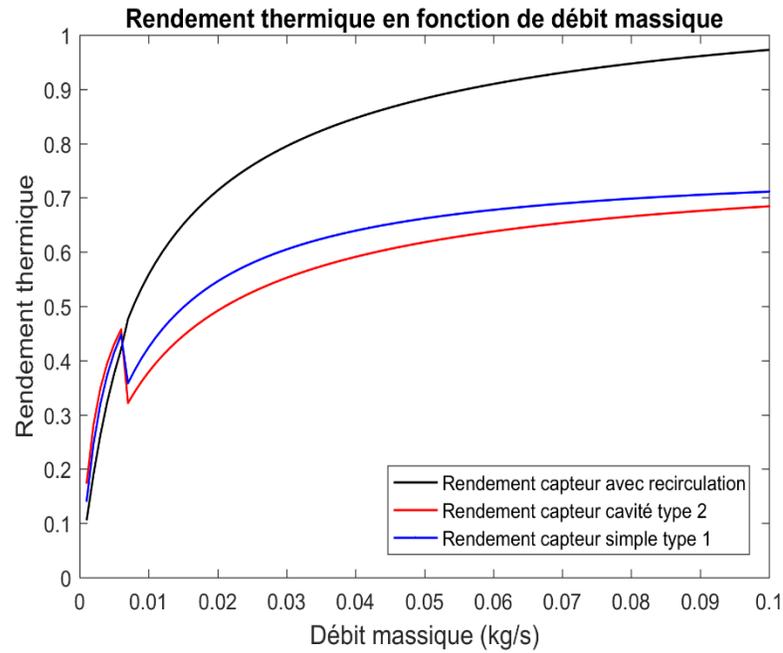


Figure IV.5 : Influence de débit massique (m_f) sur le rendement thermique (η_{th}) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

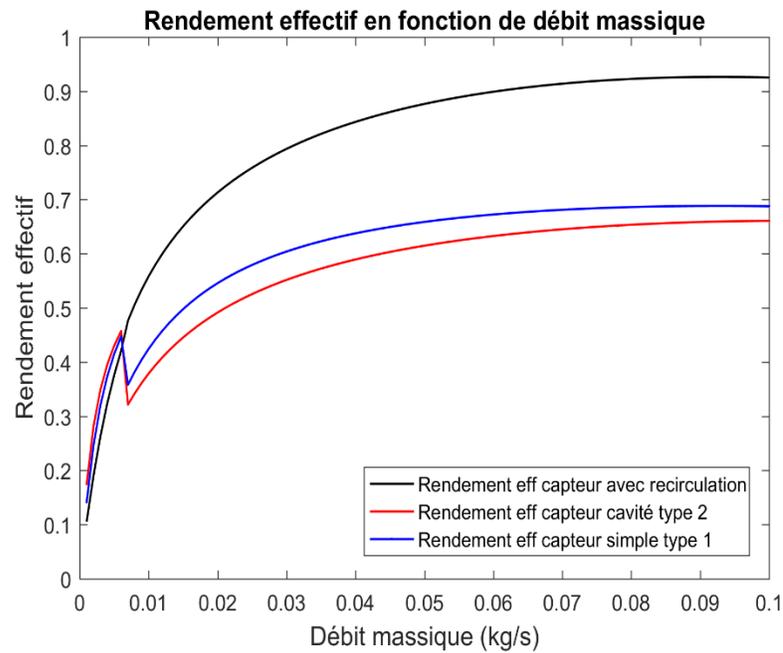


Figure IV.6 : Influence de débit massique (m_f) sur le rendement effectif (η_{eff}) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

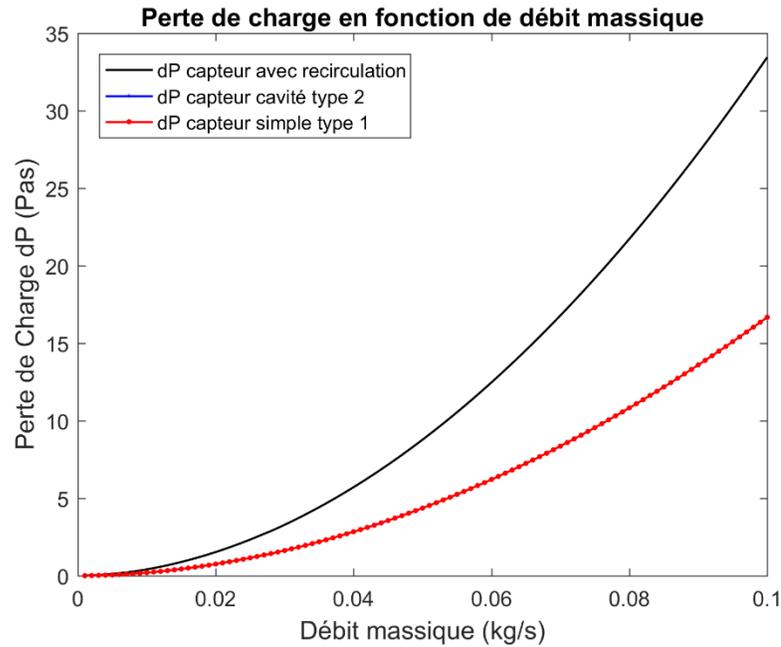


Figure IV.7 : Influence de débit massique (m_f) sur la perte de charge (ΔP) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

	m_f (kg/s)	Re	T_{fs} (K)		
			Capteur 1 (simple)	Capteur 2 (cavité)	Capteur 3 (recirculation)
Régime laminaire	0.0040	1443	332.967	334.873	328.577
	0.0050	1804	329.257	330.336	326.522
	0.0060	2165	326.277	326.865	324.711
Régime turbulent	0.0240	8663	308.426	307.633	311.032
	0.0250	9024	308.172	307.414	310.707
	0.0260	9385	307.934	307.208	310.401

Tableau. IV.6: Comparaison des températures de sortie (T_{fs}) pour les trois capteurs 1, 2 et 3 pour les deux régimes d'écoulements laminaire et turbulent.

	m_f (kg/s)	Re	Capteur 1 (simple)		Capteur 2 (cavité)		Capteur 3 (recirculation)	
			$\eta_{th}(\%)$	$\eta_{eff}(\%)$	$\eta_{th}(\%)$	$\eta_{eff}(\%)$	$\eta_{th}(\%)$	$\eta_{eff}(\%)$
Régime laminaire	0.0040	1443	37.4172	37.4169	39.5810	39.5807	32.4349	32.4344
	0.0050	1804	41.5087	41.5083	43.0387	43.0382	37.6286	37.6276
	0.0060	2165	44.7363	44.7356	45.7370	45.7362	42.0709	42.0694
Régime turbulent	0.0240	8663	57.3819	57.3452	51.9828	51.9461	75.1328	75.0581
	0.0250	9024	57.9751	57.9337	52.5950	52.5537	75.9543	75.8704
	0.0260	9385	58.5339	58.4876	53.1769	53.1307	76.7347	76.6407

Tableau. IV.7: Comparaison des rendements thermiques et effectifs (η_{th}, η_{eff}) pour les trois capteurs 1, 2 et 3 pour les deux régimes d'écoulements laminaire et turbulent.

Les figures IV.4 jusqu'à IV.8 montrent l'effet de débit massique sur la température de sortie de fluide, le rendement thermique, le rendement effectif et la perte de charge. On peut remarquer que l'augmentation de débit massique provoque une diminution de température de sortie vue de la diminution de temps de séjour d'air au sein de capteur. En parallèle, elle provoque une augmentation des deux rendements thermique et effectif à cause de rapport d'augmentation de la masse qui augmente considérablement l'énergie thermique transporté par l'air. On remarque aussi qu'il y a une légère différence entre les deux rendements à cause d'augmentation des pertes de charges.

On peut remarquer aussi que le capteur plan à deux passage avec recirculation d'air (type 3) présente des meilleures performances en terme de température de sortie et rendements dans le cas de régime turbulent par rapport les deux capteurs 1 et 2 ; où il présente en contre partie des faibles performances en régime laminaire par rapport aux deux autres capteurs (1 et 2). Ces observations sont confirmées à travers les résultats numériques présentés dans les tableaux IV.5 et IV.6. Alors on peut constater que la conception de capteur avec recirculation semble utile que pour des débits massiques qui correspondent un régime turbulent.

IV.3.2. Influence de longueur de capteur :

Pour montrer l'effet de la longueur de capteur, on a choisi un intervalle $L = [0.001 - 0.1]$ (m). Le débit massique est $m_f = 0.0249$ kg/s qui correspond à un régime turbulent où $Re = 9000$. La profondeur de canal est $t_1 = t_2 = 0.0254$ m.

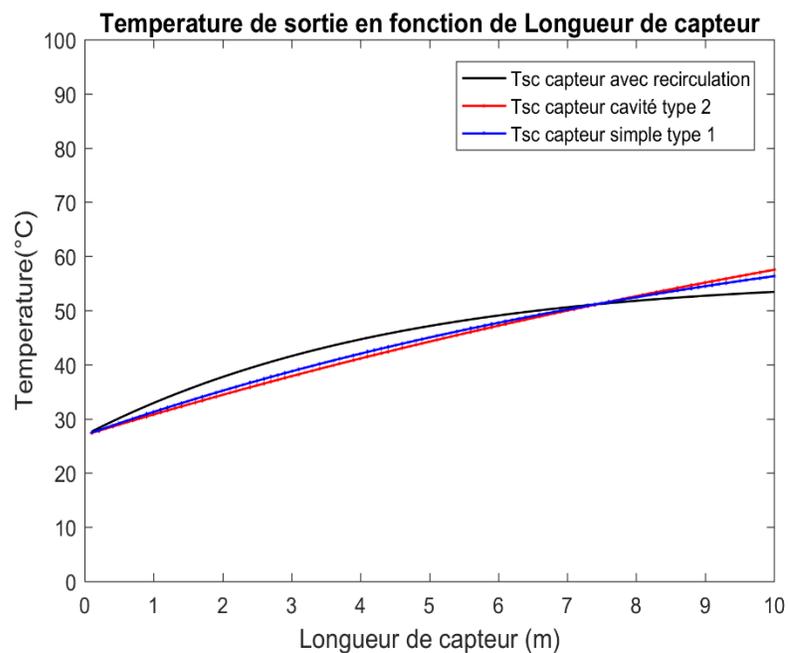


Figure IV.8 : Influence de la longueur de capteur (L) sur la température de sortie du fluide (T_f) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

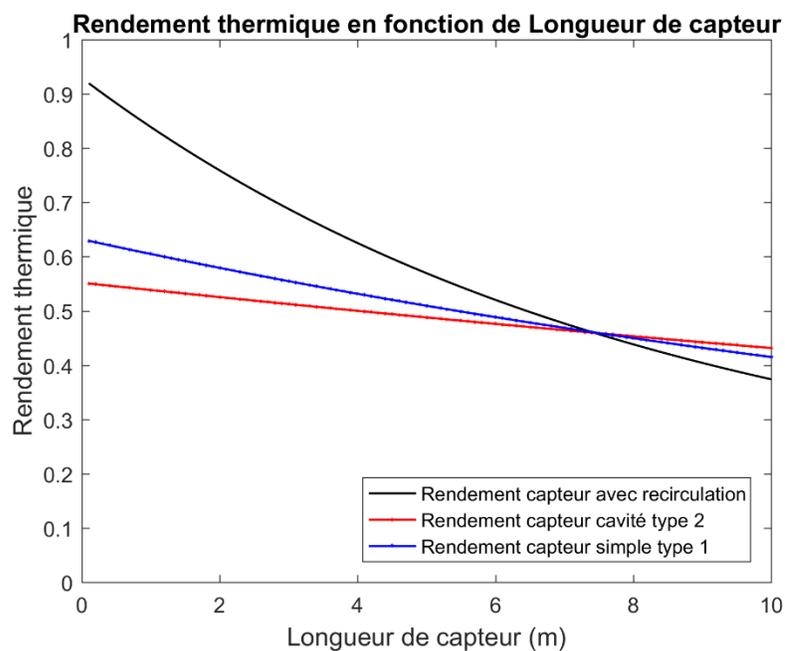


Figure IV.9 : Influence de la longueur de capteur (L) sur le rendement thermique (η_{th}) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

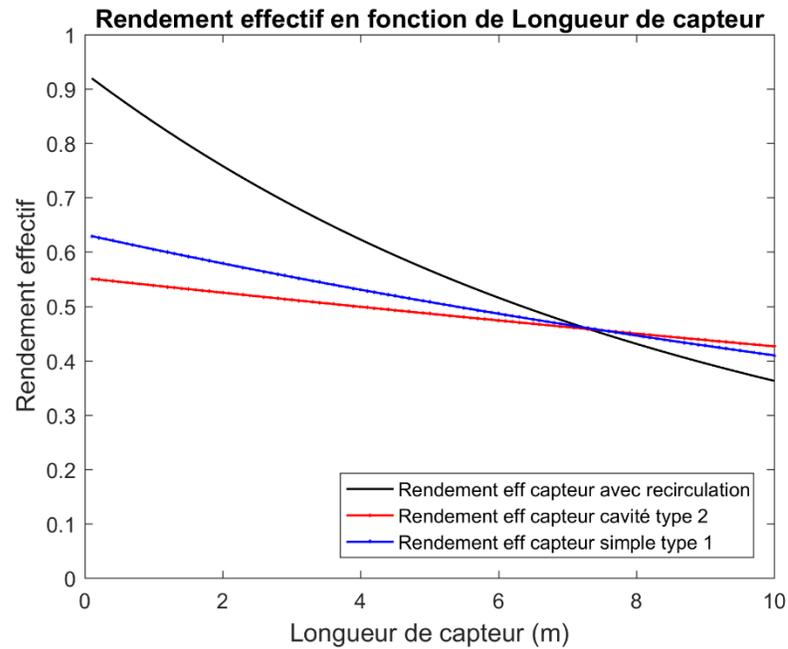


Figure IV.10 : Influence de la longueur de capteur (L) sur le rendement effectif (η_{th}) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

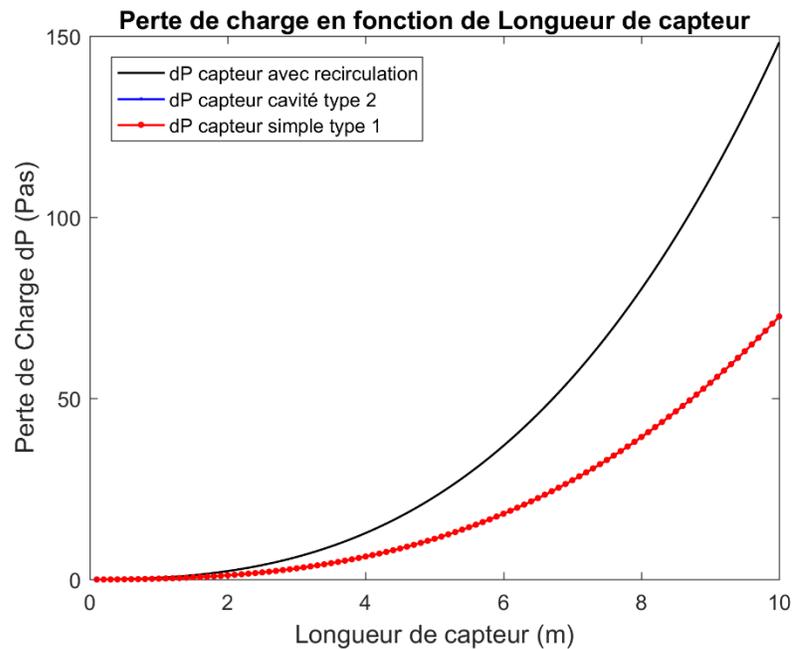


Figure IV.11 : Influence de la longueur de capteur (L) sur la perte de charge (ΔP) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

	L (m)	T_{fs} (K)		
		Capteur 1 (simple)	Capteur 2 (cavité)	Capteur 3 (recirculation)
Zone 1	4.7000	317.1448	316.3341	319.4516
	4.9000	317.7239	316.9454	319.9086
	5.1000	318.2924	317.5503	320.3446
Zone 2	8.3000	326.0748	326.4011	325.0968
	8.5000	326.4872	326.9051	325.2869
	8.7000	326.8918	327.4036	325.4674

Tableau. IV.8: Comparaison des températures de sortie (T_{fs}) pour les trois capteurs 1, 2 et 3 pour une longueur variable de capteur (L).

	L (m)	Capteur 1 (simple)		Capteur 2 (cavité)		Capteur 3 (recirculation)	
		η_{th} (%)	η_{eff} (%)	η_{th} (%)	η_{eff} (%)	η_{th} (%)	η_{eff} (%)
Zone 1	0.0040	51.6127	51.4658	49.1719	49.0257	58.5569	58.2548
	0.0050	51.1782	51.0211	48.9301	48.7737	57.4864	57.1629
	0.0060	50.7482	50.5805	48.6896	48.5226	56.4418	56.0963
Zone 2	0.0240	44.4491	44.0649	45.0055	44.6225	42.7820	41.9832
	0.0250	44.0898	43.6890	44.7855	44.3860	42.0917	41.2582
	0.0260	43.7342	43.3166	44.5666	44.1503	41.4178	40.5488

Tableau. IV.7: Comparaison des rendements thermiques et effectifs (η_{th}, η_{eff}) pour les trois capteurs 1, 2 et 3 pour une longueur variable de capteur (L).

D'après les figure IV.8 jusqu'à IV.11, on peut remarquer que l'augmentation de la longueur de capteur provoque une augmentation de température de sortie de fluide à cause de l'augmentation de surface d'échange fluide/absorbeur et le temps de séjour. En parallèle, on remarque une diminution des rendements thermique et effectif due au rapport d'augmentation de rayonnement totale reçu par le capteur qui dépasse le rapport d'augmentation de la longueur. On remarque aussi que les rendements effectifs sont légèrement inférieurs par rapport aux rendements thermiques à cause des pertes de charges qui nécessitent une puissance consommée par la machine qui force l'écoulement (ventilateur).

On peut remarquer aussi d'après les deux tableaux IV.6 et I.7 que le capteur avec recirculation possède des performances inférieures aux celles des capteurs 1 et 2 si on dépasse certain longueur. Donc on peut dire que l'introduction de recirculation à un capteur avec un seul passage sera inutile pour des longueurs supérieures.

IV.3.3. Influence de la profondeur de canal d'air :

Pour étudier l'influence de la profondeur de canal d'air sur les performances de capteur avec recirculation, on a choisi un intervalle $t_1 = t_2 = [0.014 - 0.15]$ (m) avec un débit massique $m_f = 0.01$ ($\frac{kg}{s}$) et une longueur $L = 2$ m.

Pour expliquer l'effet de profondeur de canal sur le comportement de la température de sortie de fluide, on a tracé aussi l'évolution de Nusselt moyen à la sortie de capteur en fonction de profondeur.

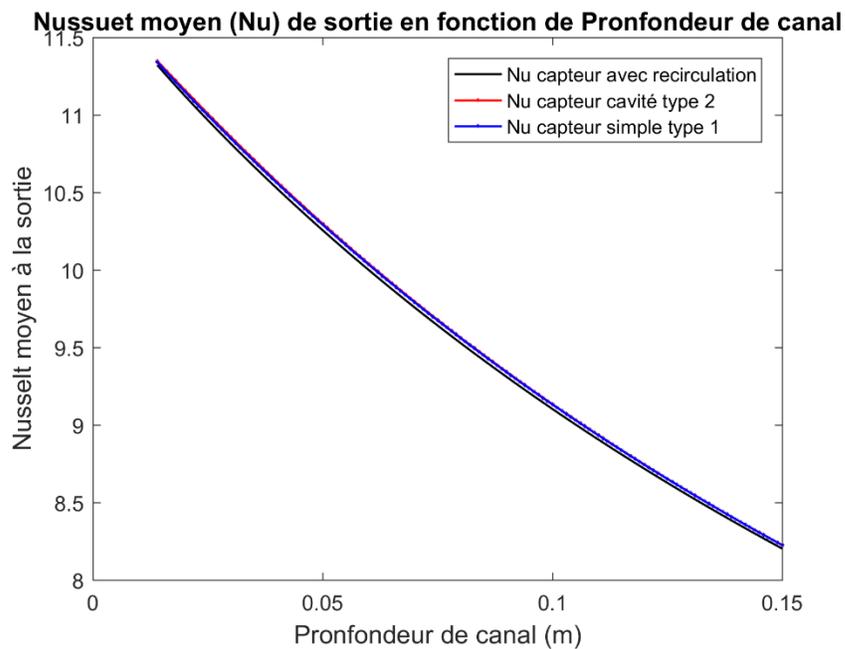


Figure IV.12 : Influence de profondeur de canal (t) sur le Nusselt moyen à la sortie (Nu) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

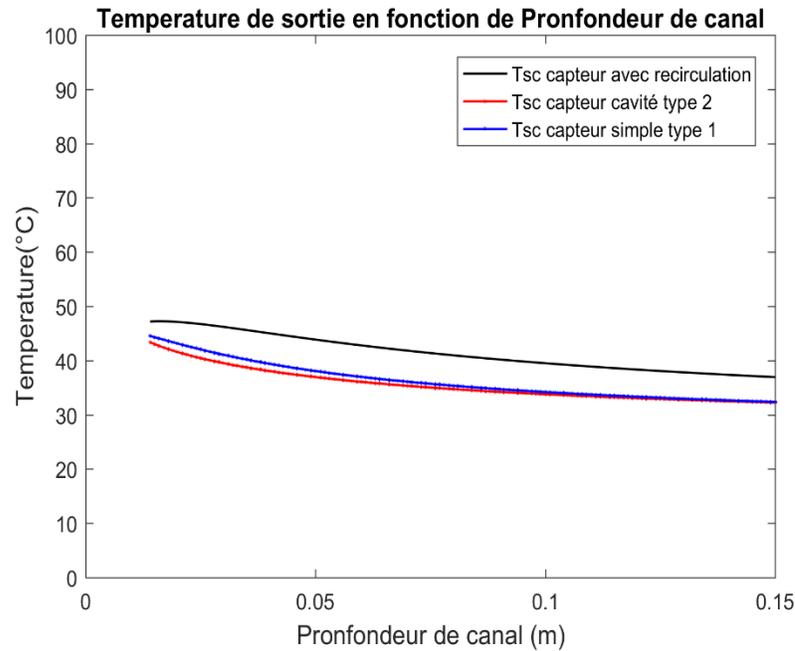


Figure IV.13 : Influence de profondeur de canal (t) sur la température de sortie de fluide (T_f) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

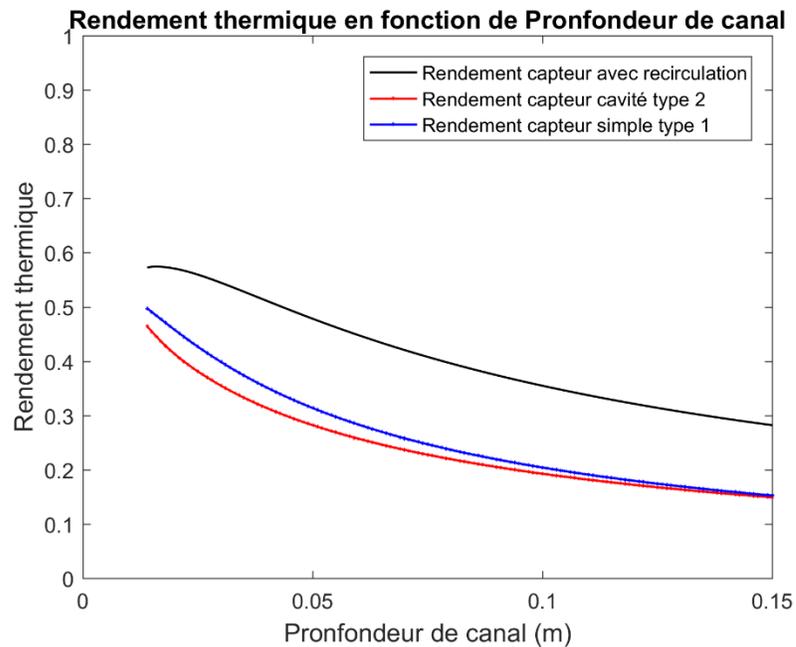


Figure IV.14 : Influence de profondeur de canal (t) sur le rendement thermique (η_{th}) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

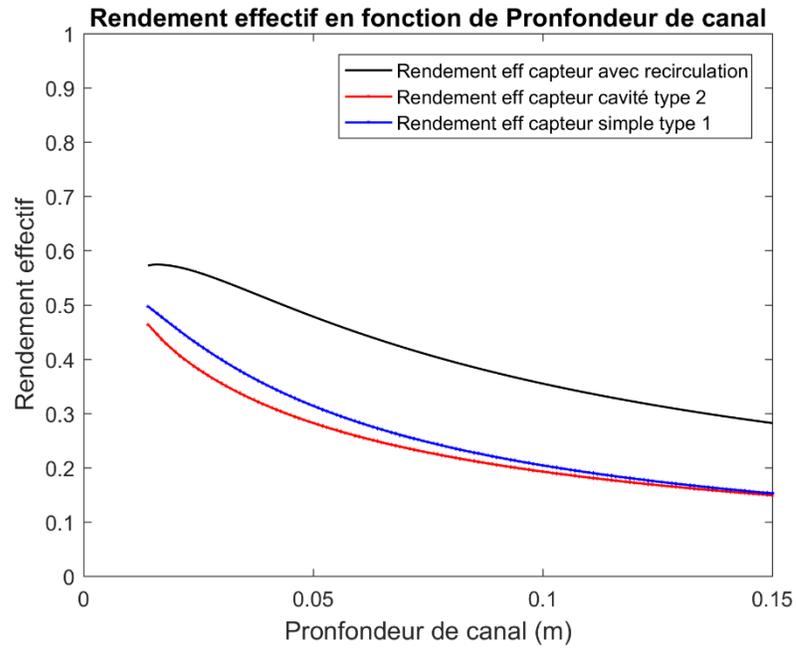


Figure IV.15 : Influence de profondeur de canal (t) sur le rendement effectif (η_{eff}) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

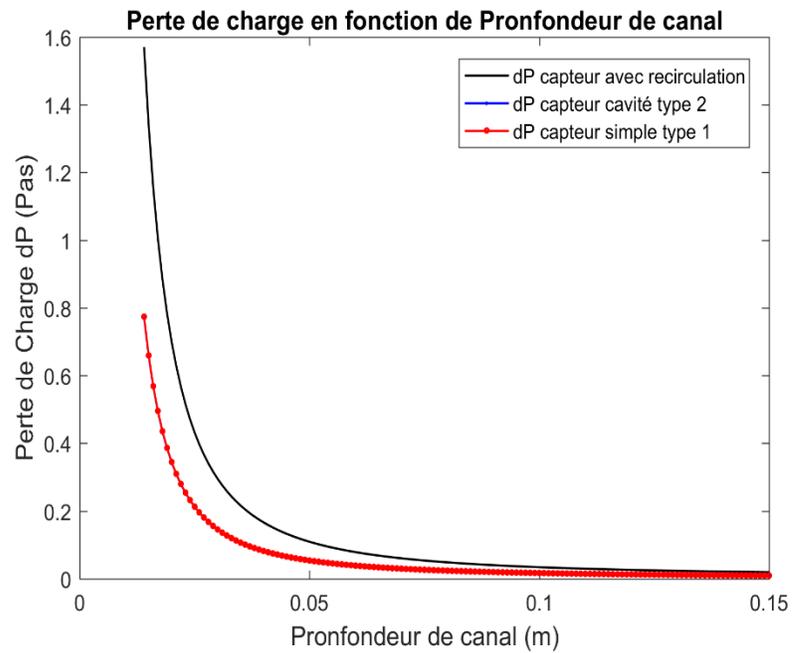


Figure IV.16 : Influence de profondeur (t) sur la perte de charge (ΔP) pour les capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation).

D'après les figures IV.12 jusqu'à IV.15, on remarque que l'augmentation de la profondeur de canal provoque une diminution de température de sortie d'air à cause de la diminution de Nusselt moyen qui exprime l'intensité de transfert de chaleur fluide/absorbeur. La diminution de Nombre de Nusselt peut s'expliquer par la diminution de la masse de fluide en contact avec l'absorbeur due à l'augmentation de profondeur de canal.

On remarque aussi qu'il y a une diminution des deux rendements thermique et effectif à cause de la diminution de la température de sortie. On peut remarquer aussi que le rendement thermique est supérieur par rapport au rendement effectif à cause des pertes de charges. A travers la figure IV.16, on remarque qu'il y a une diminution des pertes de charges avec l'augmentation de profondeur de canal à cause de la diminution de vitesse d'écoulement.

IV.4. Régime instationnaire :

Pour analyser le comportement transitoire de capteur solaire plan à double passage avec recirculation d'air on a choisis les mêmes paramètres géométriques et optiques utilisés dans la partie stationnaire avec une longueur déférente. Deux débits massiques sont sélectionnés qui correspondent un régime laminaire et un régime turbulent.

Le matériau choisi pour la plaque et l'absorbeur est le cuivre.

Les différentes données géométriques et physiques sont présentées dans les deux tableaux suivant :

	L[m]	W[m]	t_1, t_2 [m]	X_{b1}, X_{b2} [m]	fi (°)
Capteur 1	2	0.254	0.0254	0.025	27
Capteur 2	2	0.254	0.0254	0.025	27
Capteur 3	2	0.254	0.0254	0.025	27

Tableau IV.8 : Propriétés géométriques des capteurs.

	matériau	ρ (kg/m ³)	c_p ($\frac{j}{kg \cdot K}$)
Vitre	Vitre ordinaire	2500	750
absorbeur	Cuivre	8960	380
plaque	Cuivre	8960	380

Tableau IV.9 : Propriétés physiques des composants.

Deux journées types sont considérées dans cette simulation et ils sont présentés avec les températures ambiantes moyennes correspondantes à la région de Naama [8] dans le tableau suivant :

	16 décembre	16 Aout
T_a (°C)	7.5	27.7

Tableau IV.10 : Journées de simulation température ambiantes.

La température d'entrée de fluide pour chaque capteur est $T_{fe} = T_a$.

Les résultats de l'évolution de rayonnement solaire, accompagnées avec les évolutions de température de sortie de capteur avec recirculation comparées aux autres capteurs (1 et 2) ; pendant chaque journée considérée sont présentés dans les figures suivantes en considérant la latitude et la longitude de Naama $La = 33.2666700^\circ$ et $Long = -0.3166700^\circ$.

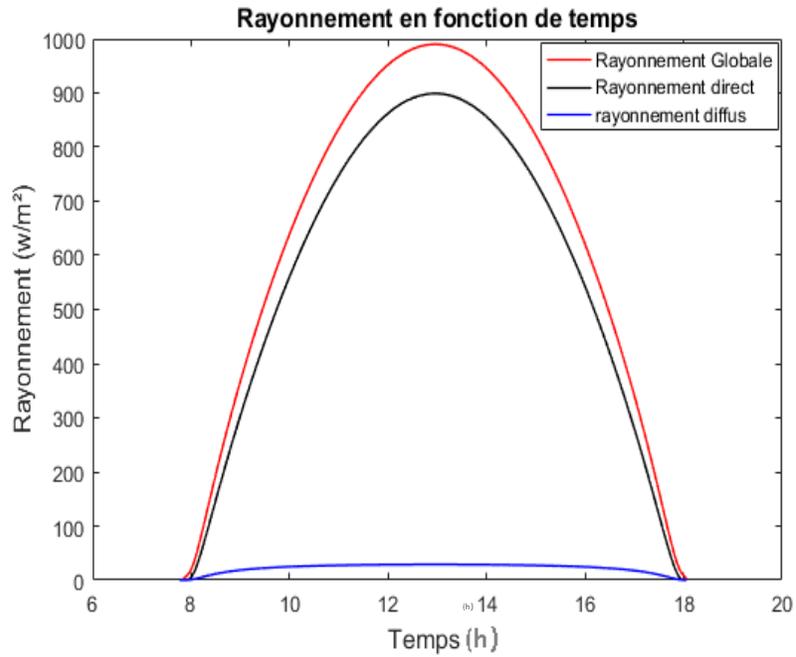


Figure IV.17 : Comportement instationnaire de rayonnement solaire pour le 16 décembre à Naama.

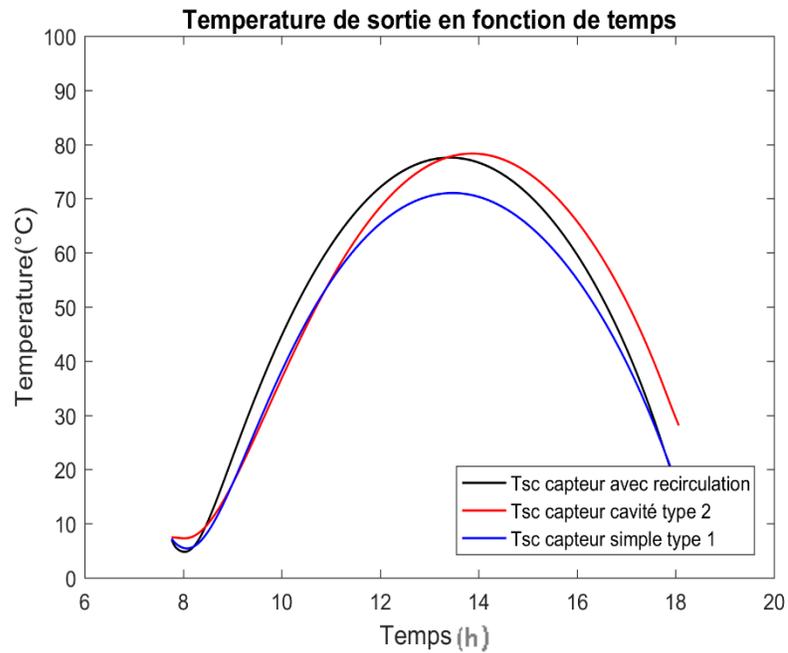


Figure IV.18 : Comportement instationnaire de température de sortie des trois capteurs : 1, 2 et 3 pour le 16 décembre à Naama pour $Re=700$.

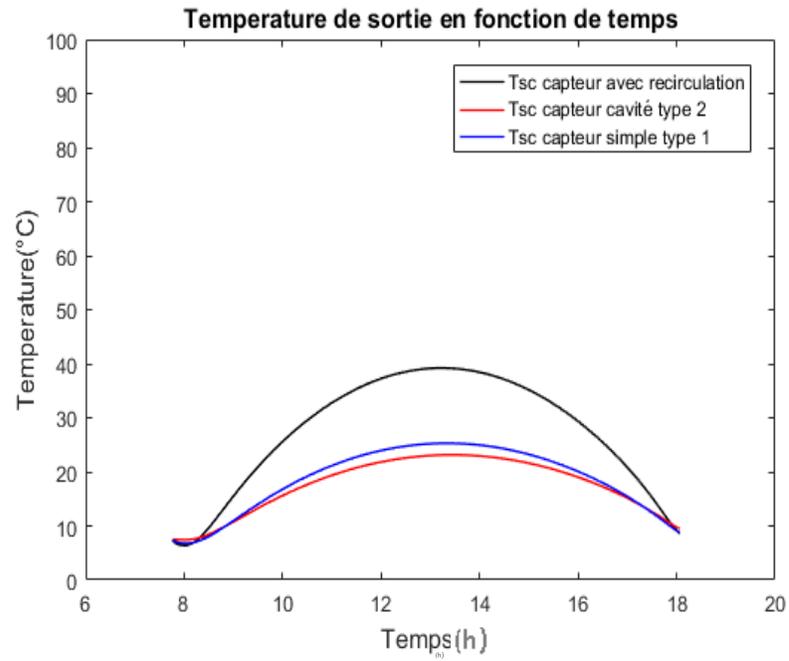


Figure IV.19 : Comportement instationnaire de température de sortie des trois capteurs : 1, 2 et 3 pour le 16 décembre à Naama pour $Re=5000$.

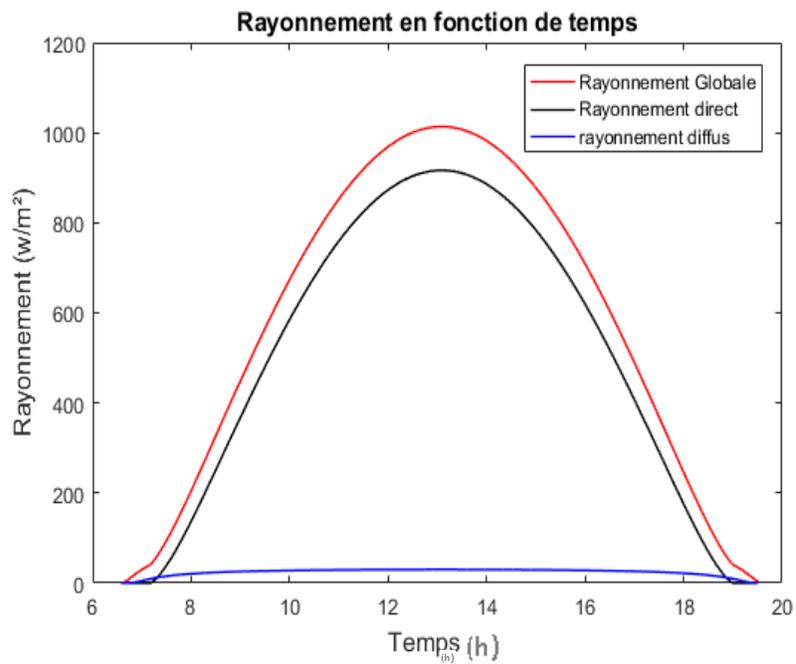


Figure IV.20 : Comportement instationnaire de rayonnement solaire pour le 16 Aout à Naama.

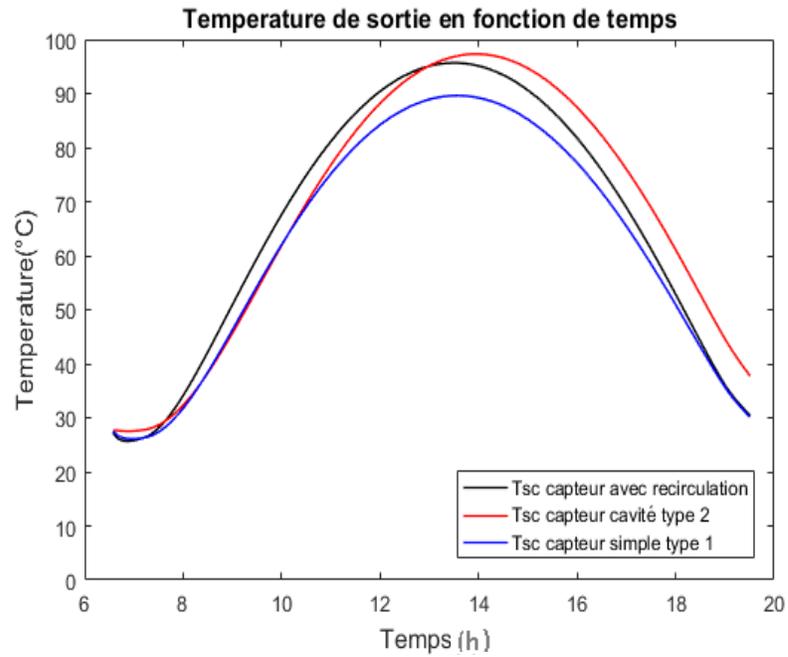


Figure IV.21 : Comportement instationnaire de température de sortie des trois capteurs : 1, 2 et 3 pour le 16 Aout à Naama pour $Re=700$.

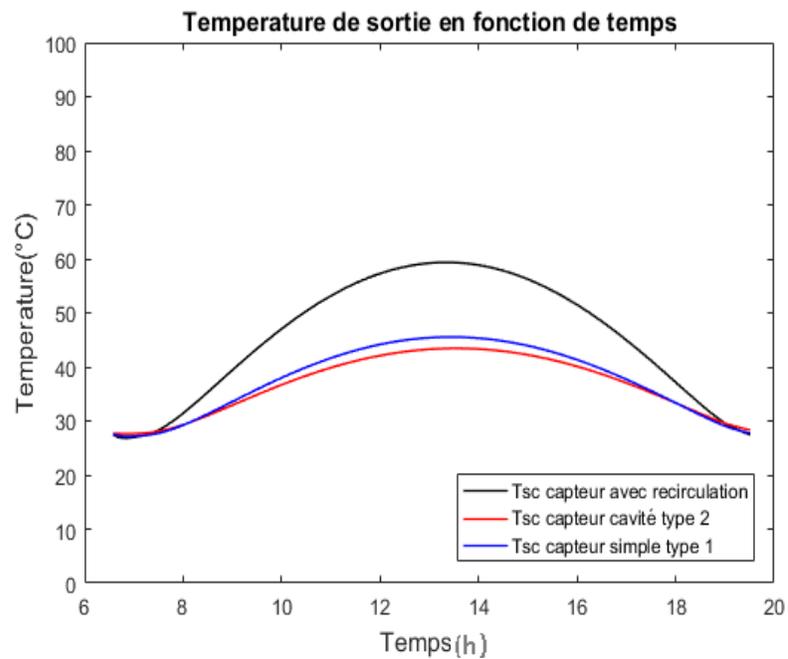


Figure IV.22 : Comportement instationnaire de température de sortie des trois capteurs : 1, 2 et 3 pour le 16 Aout à Naama pour $Re=5000$.

	16 Décembre ($T_a=8.5\text{ °C}$)		16 Aout ($T_a=27.7\text{ °C}$)	
	Re=700	Re=5000	Re=700	Re=5000
Rayonnement $I_{max} \left(\frac{W}{m^2}\right)$	990.0315		1013.5	
Capteur 1 $T_{f\ max} \text{ (°C)}$	71.0319	25.2906	89.6166	45.5311
Capteur 2 $T_{f\ max} \text{ (°C)}$	78.3173	23.1419	97.3012	43.4331
Capteur 3 $T_{f\ max} \text{ (°C)}$	77.5683	39.2074	95.6682	59.3384

Tableau IV.11 : comparaison entre les températures maximales de sorties des trois capteurs : 1 (simple), 2 (cavité), et 3 (recirculation) pour deux journées.

Les figures IV.17 et IV.20 montrent l'évolution temporelle de rayonnement solaire pour deux journées (16 décembre et 16 aout). On peut remarquer que le rayonnement augmente de temps de lever de soleil jusqu'à atteindre une valeur maximale à 13h00 et diminue vers le coucher de soleil.

Les figures IV.18, IV.19, IV.21 et IV.22 montrent l'évolution temporelle de température de sortie de capteur avec recirculation comparé aux deux autres capteurs 1 et 2. On remarque que les températures de sortie d'air des trois capteurs augmentent avec l'augmentation de rayonnement jusqu'à atteindre une valeur maximale à 13h00 pour les deux journées (16 Avril et 16 Aout). On remarque aussi à travers le tableau IV.11 que le comportement de capteur avec recirculation est meilleur par rapport aux capteurs 1 et 2 dans le cas de régime turbulent, ce qui nous permet de constater que l'introduction de recirculation dans un capteur à un seul passage n'est utile que pour des régimes turbulents.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement thermique de capteur plan solaire à air muni d'une recirculation en régime stationnaire et instationnaire, fonctionnant en régime forcé, en utilisant la méthode de Newton-Raphson pour résoudre les systèmes d'équations basés sur les bilans énergétiques.

Un code de calcul en MATLAB a été élaboré. Ce code nous permet de simuler le comportement thermique pour trois (03) configurations des capteurs solaires plans à air : capteur à double passage avec recirculation, capteur à un seul passage avec cavité fermée et capteur simple à un seul passage.

Nous avons validé notre programme de calcul pour deux configurations (02) à un seul passage (capteur avec cavité, capteur simple), en régime stationnaire. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec la référence [7].

Le capteur avec recirculation a été étudié et comparés aux autres configurations sans recirculation en régime stationnaire et instationnaire.

Ce travail nous a permis d'aboutir les conclusions suivantes :

- L'augmentation de débit massique d'air provoque une diminution de température de sortie et une augmentation de rendement thermique, rendement effectif et pertes de charge.
- L'augmentation de la longueur de capteur améliore la température à la sortie mais affaibli le rendement thermique et effectif.
- L'augmentation de la profondeur de passage d'air provoque une diminution des performances des capteurs soit sans ou avec recirculation.
- Les pertes de charge sont meilleurs pour des faibles débits massiques d'air, des petites longueurs de capteur et petites profondeurs de passage soit dans les cas sans ou avec recirculation.
- L'utilisation de recirculation dans un capteur plan à un seul passage n'est utile que pour des débits massiques qui correspondent à des régimes turbulents.

Conclusion générale

- L'introduction de recirculation à partir certain longueur de capteur à un seul passage est inutile.
- Le comportement journalier des capteurs soit sans ou avec recirculation est fortement influencé par le rayonnement solaire et la température ambiante où il présente des températures supérieurs pour les jours de forte intensité solaire.

Enfin, on peut proposer à travers cette étude les perspectives suivantes :

- Une étude de capteur avec recirculation en reposant sur des modèles CFD
- Faire une étude d'optimisation pour déterminer les plages optimales des paramètres géométriques qui correspondent à des températures maximales d'air à la sortie et des pertes de charge minimale, afin de maîtriser la conception de capteur avec recirculation.

La programmation sur MATLAB se faite comme exemple :

Boucle de calcul la température de sortie du capteur 1 en régime instationnaire:

```

for it=1:nt
    T1t0=VT1t0(i);
    Tf1t0=VTf1t0(i);
    T2t0=VT2t0(i);
    S1=G(it)*alpha1;
    S2=G(it)*alpha2*trans;
    %%%%%%%%%% iterative solution by Newton-Raphson algorithm %%%%%%%%%%
    for i=1:nex
        %%%%%%%%%% iterative solution by Newton-Raphson algorithm %%%%%%%%%%
        k=0; % initial iteration number
        dVT=ones(3,1)*20;
        VT=ones(3,1);
        while (norm(dVT))>0.0001
            k=k+1;
            Jf=Jacoby_matrix_coefficient_simple_single_pass(T10,T20,Tf10,epsilon1,epsilon
            2,sigma,Dh,mf,dx,Vw,Ta,Xb,kb,W,t1,Recl,Rec2,Tf1t0,dt,Cpv,rhov,ev,Cpabs,rhoabs
            ,eabs);

            VF=functions_Newton_Raphson_linearization_simple_single_pass1(Tfi,Ta,T10,T20,
            Tf10,S1,S2,Dh,mf,epsilon1,epsilon2,sigma,Vw,Xb,kb,dx,W,t1,Recl,Rec2,Cpv,rhov,
            ev,Cpabs,rhoabs,eabs,T1t0,Tf1t0,T2t0,dt);

            B=Jf*VT0-VF';
            VT=Jf\B;
            dVT=VT-VT0;
            T10=VT(1);Tf10=VT(2);T20=VT(3);
            VT0=VT;
            %-----
            k;
        end
        %%%%%%%%%%
        VT1(i)=VT(1);
        VTf1m(i)=VT(2);
        VT2(i)=VT(3);
        %----deduction of Tfo -----
        Tfo=2*VTf1m(i)-Tfi;
        %-----re-initialization -----
        Tfi=Tfo;Tf10=VT(2);T20=VT(3);T10=VT(1);VT0=VT;
        %-----
    end
    Tfi=Ta;Tf10=Ta+DT;T10=VT1(1);T20=VT2(1);

    VT1t0=VT1;
    VTf1t0=VTf1m;
    VT2t0=VT2;
    VTf1os(it)=Tfo;
    M_VT1(:,it)=VT1;
    M_VT2(:,it)=VT2;
    M_VTf1m(:,it)=VTf1m;
end
plot(t,VTf1os)

```

Références bibliographiques

- [1] S.BENLAHMIDI, « réalisation d'une interface de simulation des performances des insolateurs plans » N°13, Avril 2012, pp.35-40.
- [2] SAADI SOUAD, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan université ». Université de Constantine 2010.
- [3]ASHRAE, « handbook Fundamentals, chapter 14 climatic design information, calculating clear-sky solar radiation », 2009.
- [4] Yves Jannot, « Thermique solaire », octobre 2003.
- [5] Sandali. M « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux », mémoire de magister, université de tlemcen 2014.
- [6] Choudhury C, Chauhan PM, Garg HP, « Design curves for conventional solar air heaters.Renewable energy 1995 » ; 6(7):739–49.
- [7] Ong KS. “Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure”. Solar Energy 1995; 55(2):93–109.
- [8] Tchinda, “A review of the mathematical models for predicting solar air heaters systems”.Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1734–1759.
- [9] Njomo D, Dagueuet M. “Sensitivity analysis of thermal performances of flat plate solar air heaters”. Heat Mass Transfer 2006; 42:1065–81.
- [10] Hegazy AA, “Performance of the flat solar air heaters with optimum channel geometry for constant/variable flow operation”. Energy Conversion and Management 2000; 41:401–17.
- [11] Garg HP, Chandra R, Rani U, “Transient analysis of solar air heaters using finite differences technique”. Energy Research 1981; 5:243–52.
- [12] Ben Guehza Mohammed Lahkdar, « impact de l'espace entre les deux vitrages sur le rendement d'un capteur solaire »2009.
- [13] Mohamad AA. “High efficiency solar air heater”. Solar Energy 1997;60(2): 71–6.

[14] Yeh Ho-Ming, Chii-Dong Ho, Jun-Ze Hou. “The improvement of collector efficiency in solar air heaters by simultaneously air flow over and under the absorbing plate”. *Energy* 1999;24:857–71.

[15] D.SEMMAR ET AL « Etude et réalisation d’un séchoir solaire plan à air », revue énergies renouvelables, physique énergétique ; pp 33-38 ; (1998).

[16] Wijesundera NE. “A net radiation method for the transmittance and absorptivity of series of parallel regions”. *Solar Energy* 1975;17:75.

[17] Verma Ratna, Chandra Ram, Garg HP. “Optimization of solar air heaters of different designs”. *Renewable Energy* 1992;2(4/5):521–31.

[18] Baa Yousef Et Nm Adam, “Performance analysis for flat plate collector with and without porous media”, *Journal of Energy in Southern Africa* • Vol 19 No 4 • November 2008.

[19] F. Mokhtari 1, D. Semmar1, A. Hamid « Etude de la Variation de la Température de la Plaque Absorbante pour Différents Capteurs Solaires ». *Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique* (2003) 47-51.

[20] K. Mohammadi, M. Sabzpooshani, “Comprehensive performance evaluation and parametric studies of single pass solar air heater with fins and baffles attached over the absorber plate”, *Energy*, Vol. 57, 2013, pp. 741-750.

Site web:

[21] [http// www.mem.algria.org](http://www.mem.algria.org). Potentiel solaire en Algérie