

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
FACULTE DES SCIENCES



LABORATOIRE DE PYSIQUE
ENERGETIQUE APPLIQUEE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MAGISTERE

EN
PHYSIQUE
Option : **ÉNERGÉTIQUE**

PAR
ABDESSEMED AMINA

ETUDE ET MODELISATION D'UN CONVERTISSEUR HELIOTHERMIQUE

Soutenu le 01/07/2010, devant le jury composé de:

Devant le Jury :

Soudani Azeddine	Prof., Univ. Batna	Président
Aouachria Zeroual	M.C.A, univ.Batna	Rapporteur
Hadef Rdjem	Prof. Univ. O. Bawaki	Examineur
Bougoul Saadi	Prof., Univ. Batna	Examineur

Année Universitaire 2009 / 2010

Remerciements

*Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné
durant tous ces années d'étude.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur Z. Aouachria
Docteur d'état, pour
avoir assuré la direction de ce mémoire, pour sa confiance constante
et pour ses
encouragements tout au long de ces deux années de travail.*

*Je remercie tout particulièrement Monsieur Professeur
A.Soudani et chef
de département de physique, université de Batna, pour l'honneur qu'il
m'a fait en présidant
le jury de ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au professeur
S.Bougoul, université de Batna.*

Monsieur R.Hadef, Professeur, université d'oum elbouaghi,

Mes remerciements vont encore à :

*Mes collègues et amis pour leur soutien et leur aide à finaliser ce
travail,*

*Enseignants, et doctorants de département de physique, pour
leur soutien moral et
leur accueil chaleureux.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

A mon mari et mon fils Didou

Mon père et ma mère.

Mes frères et ma soeur.

Mes beaux parents.

*Les familles Abdessamed, Merad et
Khenniche.*

Mes collègues d'étude.

*A tous ceux qui m'ont aidé dans les
moments difficiles.*

Amina Abdessamed

Nomenclature du 2^o chapitre

A: l'aire de la surface de l'absorbeur	[m ²]	
D* : l'éclairement solaire diffus	[W/m ²]	
e: l'épaisseur du mur	[m]	
G* : densité de flux solaire global	[W/m ²]	
H: La hauteur du soleil		[°] h:
coefficient de transfert de chaleur par convection	[W/m ² K]	
I : irradiation solaire journalière	[W/m ² .j]	
I* : densité de flux solaire	[W/m ²]	
l : la latitude	[°]	
: La luminance du rayonnement	[W/ (m ² .sr)]	$L(\theta, \varphi)$
M : l'émittance énergétique	[W/m ²]	
q: quantité de chaleur	[J]	
t: le temps	[s]	
T la température	[K]	
TS : L'heure solaire dans la journée	[h]	
S : irradiation solaire journalière directe	[W/m ² .j]	
S*: l'éclairement solaire direct	[W/m ²]	
α : coefficient d'absorption		
σ : La constante de Stefan $5.67 \cdot 10^{-8}$	[W/m ² K ⁴]	
δ : déclinaison	[°]	
ε : émissivité		
ε_p : Facteur d'émission de la surface		
ρ : coefficient de réflexion		
τ : coefficient de transmission		
λ : La longueur d'onde	[μ m]	
λ : la conductivité thermique	[W/m.K]	
φ : Flux de chaleur	[W]	
ω : L'angle horaire	[°]	
ω_1 : angle solaire au lever du jour	[°]	
Ω : angle solide	[sr]	

Nomenclature du 3^o chapitre

α	: Le facteur total d'absorption du capteur	
α'	: Coefficient d'absorption de l'environnement	
ε	: le facteur total d'émission du capteur	
C	: la concentration géométrique du rayonnement solaire	
σ	: La constante de Stefan [5.67*10 ⁻⁸]	[W/m ² K ⁴]
γ	: le coefficient de performance du capteur	
G^*	: la puissance incidente du soleil	[W/m ²]
k, k _s	: la fraction d'énergie contenue dans la bande 0- λ aux températures T et T _s	
Φ_u	: Le flux de chaleur utile	[W]
η_R	: le rendement radiatif	
P _C	: Les pertes de puissance par convection et de conduction	[W/m ²]
s	: le paramètre de la sélectivité	
S	: la surface d'un réflecteur	[m ²]
s [*]	: la surface de l'absorbeur	[m ²]
T _s	: La température du soleil	[K]
T _{en}	: La température de l'environnement	[K]
T	: La température de l'absorbeur	[K]
λ_{co}	: La longueur d'onde de coupure optimale	[μ m]

Sommaire

Chapitre 01

Introduction générale et synthèse bibliographie

Introduction.....	03
-------------------	----

Chapitre 02

Etude théorique d'un convertisseur héliothermique

Introduction.....	09
I- Rappel sur les transferts de chaleur.....	09
I-1- la conduction.....	10
I-2- Echange de chaleur par convection.....	11
I-3- le rayonnement thermique	13
I-3-1-classification selon la composition spectrale.....	13
I-3-1-1-Grandeurs totales de l'énergie rayonnée.....	14
A/Flux énergétique.....	14
B/Luminance.....	14
C/ Intensité énergétique élémentaire.....	15
D/ emittance énergétique.....	16
E/ Eclairage énergétique.....	16
I-3-1-2/Grandeurs monochromatiques.....	17
I-3-1-3/Absorption, réflexion, transmission.....	17
A/facteur monochromatique directionnels.....	17
B/Emissivité monochromatique directionnelle.....	19
C/émissivité totale directionnelle.....	20
II-La concentration géométrique et le concentration énergétique.....	20
III- Aperçu sur l'énergie solaire.....	22
III-1/rayonnement solaire au sol.....	23
A/le rayonnement direct.....	25
A-1/l'éclairage S^*	25
A.2/l'irradiation directe journalière S	26
B/le rayonnement diffus.....	27
B.1/l'éclairage D^*	27
B.2/l'irradiation D	28
IV/Les capteurs solaires.....	29
IV-1 Définitions et compositions.....	29

IV-1-1 la couverture de vitre.....	29
IV-1-2 L'absorbeur.....	30
IV.1.3 Fluides caloporteur.....	31
IV.1.4 le circuit échangeur.....	32
IV.1.5 L'isolation arrière et latérale.....	33
IV-2 Les types des capteurs solaires.....	35
IV-2-1/Les capteurs plans non vitrés dit " capteur moquette ".....	35
IV-2-2 Les capteurs plans avec vitrage.....	35
IV-2-3/Les capteurs sous vide.....	36
IV-3/Le principe de fonctionnement d'un capteur thermique.....	37
IV-4 Choix de l'orientation et de l'inclinaison.....	39
Chapitre 03	
Analyse et modélisation des propriétés d'absorbeur	
Introduction.....	41
III-1- La caractérisation microscopique de la surface.....	42
III-2- Caractérisation optique.....	43
III-3- Analyse du phénomène de rayonnement	44
III-3-1-Etude de l'absorbeur.....	46
III-3-2-Le rendement.....	47
III-3-3-la sélectivité d'une surface	49
III-3-4-Augmentation de l'énergie captée e par utilisation de surfaces sélective...	49
III-3-5- Modélisation d'une surface.....	50
III-3-6- Caractéristique d'une surface sélective.....	55
A/ Optimisation de la longueur d'onde de coupure.....	55
B/ La valeur limite de la température.....	57
Chapitre 04	
simulations des paramètres de l'absorbeur	60
Chapitre 05	
Résultats et discussions	65
Conclusion générale.....	
Référence bibliographique	

Chapitre 01

Synthèse bibliographique et introduction générale

Introduction

Les chercheurs scientifiques ne cessent de chercher les solutions adéquates et économiques de l'énergie et d'investiguer sur les problèmes afin de trouver des solutions aux différents problèmes rencontrés dans la vie courante de l'être humain afin de la rendre moins pénible et meilleure. [1]

L'utilisation mondiale de l'énergie repose aujourd'hui à 80% sur les énergies fossiles comme le charbon, le gaz ou le pétrole. La plus part de ces énergies seront épuisées dans quelques dizaines d'années. De plus, beaucoup de gisements des combustibles fossiles sont situés dans des régions instables politiquement ou sont à accès difficile. C'est pourquoi l'approvisionnement en énergies fossiles pourrait devenir critique dans le futur.

Les habitudes en matière de consommation d'énergie doivent donc changer radicalement, aussi bien sur le plan national qu'international, pour préserver un développement durable. Seul un passage aux énergies renouvelables permettra de freiner l'exploitation destructrice de l'environnement et les gaspillages des matières premières.

Chacun d'entre nous peut prendre part à cette transformation, l'utilisation des énergies renouvelables contribuera largement à éviter une catastrophe climatique. Si des fonds étaient de tout cœur visés une transition rapide du fossile à l'ère du renouvelable, le progrès pourrait être beaucoup plus rapide.

Eau, soleil, vent, végétaux, marées, biomasse, géothermie peuvent fournir de l'énergie. Ces énergies s'appellent "**les énergies renouvelables**". [2]

L'énergie renouvelable est une grandeur caractérisant un système et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes. L'énergie se manifeste de nombreuses formes (énergie électrique, mécanique, cinétique...). La conservation de l'énergie de l'univers implique que celle-ci n'est ni perdue ni créée. En revanche, si on considère un système contenu dans l'univers, si ce système perd de l'énergie, cette énergie perdue se retrouve dans un ou plusieurs autres systèmes, sous la même forme ou sous d'autres formes. Cette propriété fondamentale de l'énergie, permet à l'Homme de la capter, parfois de la stocker, et de la convertir en une forme plus appropriée à son utilisation. [3]

L'énergie renouvelable pendant les dernières décennies passé du niveau de la praticabilité technique à un niveau de l'introduction prudente dans le marché et pas moins dans la planification de gouvernement à long terme. [4]

Aujourd'hui, les énergies renouvelables peuvent être utilisées de différentes formes.

L'énergie solaire est utilisée directement pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage. Pour cela l'eau est réchauffée dans un collecteur solaire (énergie solaire thermique)

d'autre part les cellules solaires transforment les rayons solaires en courant électrique (énergie photovoltaïque).

La biomasse s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est considérée comme renouvelable si on admet que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. On peut citer notamment le bois et les biocarburants.

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes, chute, cours d'eau, marée. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

L'énergie géothermique est obtenue en exploitant la chaleur renfermée à l'intérieur de la terre. Dans la nature, la chaleur interne de la planète se manifeste par la présence de sources chaudes, de geysers et de façon parfois dramatique par les volcans et les tremblements de terre. Elle provient de la désintégration radioactive et de l'énergie solaire absorbée à travers la surface de la planète. [2]

Ce qui nous intéresse c'est l'énergie solaire. Cette dernière est transmise à la Terre à travers l'espace sous forme de particules d'énergie, les photons du rayonnement. L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs bien adaptés.

Comparé aux autres sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire présente quelque série d'avantages parmi les quels on cite:

* C'est une énergie renouvelable qui, contrairement à des idées reçues, peut être utilisée dans de nombreuses régions. L'intérêt de l'énergie solaire tient autant à l'ensoleillement au m^2 qu'à la durée de son utilisation (période de chauffage longue). C'est pourquoi le chauffage solaire est aussi intéressant à développer en Algérie que dans notre région des Aurès.

* C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas l'atmosphère. Pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage, les coûts d'installation ne sont pas très élevés.

* l'utilisation de l'énergie solaire peut permettre de soulager les tensions internationales. Elle contribue ainsi à l'échelle mondiale à éviter les conflits militaires autour des énergies fossiles et à diminuer la pauvreté. [2]

L'énergie solaire peut être captée par deux types de systèmes : système thermique (capteurs thermiques ou héliothermiques) et le système photovoltaïque (les modules photovoltaïques PV).

Le premier type convertit le rayonnement en chaleur, le deuxième type le convertit en électricité.

Le développement à grande échelle des énergies renouvelables est principalement défini selon leur compétitivité. Cette dernière dépend de cinq paramètres [6]:

- i - le prix des énergies fossiles,
- ii - le coût de fabrication des unités de conversion d'énergie solaire,
- iii- leur coût d'installation,
- iv-leur vie,
- v-les taux d'intérêt.

L'orientation stricte du convertisseur du sud ; qui donne une absorbance élevée (> 0.8) et l'environnement abrité du vent, sont nécessaires pour obtenir un soutirage acceptable d'énergie.

Utilisons un système original de sphères intégrantes permettant de réaliser ces mesures en fonction de l'incidence dans le domaine spectral de 0,35 à 13,5 μm . Ces mesures permettent de calculer les performances de la surface absorbante pour tous les types d'ensoleillement : diffus, direct à inclinaison variable.

Beaucoup d'applications d'énergie solaire exigent spectralement les revêtements sélectifs qui montrent l'absorbance solaire élevée et les basses admittances thermiques [10]. Harlan J. et al ont cherché à développer les revêtements solaire-sélectifs déposés en utilisant des méthodes peu coûteuses.

Les revêtements en acier inoxydable doivent répondre à des exigences d'exécution telles que la longévité mécanique et la stabilité thermo-chimique aux températures de fonctionnement qui peuvent approcher ou dépasser 500°C pour les tubes concentriques de récepteur d'énergie solaire. Ils ont rendu compte du traitement et des propriétés optiques des revêtements émaillés de porcelaine se composant du type à spinelle fin de support de colorants d'oxyde enfoncés dans une matrice claire de porcelaine-émail et comparons les résultats aux revêtements noirs commerciaux de l'émail de porcelaine.

Un modèle mathématique est présenté permettant de calculer les pertes thermiques vers l'avant d'un capteur solaire plan (entre l'absorbeur et l'ambiance) [11]. Comparé les résultats obtenus par rapport aux relations empiriques rencontrées dans la littérature. A. Benkhefifa et al ont exploité le programme de calcul (méthode itérative pour un système d'équation non linéaires)

pour étudier l'influence de quelques paramètres physiques et géométriques sur le coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur tels que température de la paroi absorbante, température de l'environnement ambiant et l'énergie perdue vers l'avant de l'absorbeur...

T. Mouhib et al ont commenté les propriétés d'une couche inoxydable de double acier-étain déposée sur le verre, afin de réaliser le refroidissement radiatif.

Le progrès impressionnant récent accompli dans les revêtements extérieurs minces ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine des matériaux de conversion d'énergie solaire. [12]

Le visage non-revêtu est caractérisé par une réflectivité élevée autour de $0.5 \mu\text{m}$ et d'une haute émittance infrarouge, tandis que le visage revêtu est caractérisé par une absorptance élevée particulièrement dans la gamme spectrale de $8\text{-}13 \mu\text{m}$.

B.Drévillon et al [13] étudient une comparaison des performances entre des capteurs plans et l'influence des différents paramètres comme la température de fonctionnement, la surface de captation et l'inertie thermique.

Il s'agit de capteur ayant un coefficient de perte avant de l'ordre de $1.5\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ou moins. Cela impose que le capteur thermique soit revêtu d'un absorbant sélectif et dispose d'un système anti convectif. Ces capteurs seuls peuvent fonctionner à des températures élevées. De cette investigation nous concluons que tout absorbeur doit être performant, cette performance dépend des paramètres optiques et thermiques tels que $(\alpha, \varepsilon, \lambda_c)$ dont l'influence est antagoniste. Donc le problème revient à une optimisation de ses paramètres en les modélisant d'une manière adéquate.

Notre sujet concerne le capteur thermique qui est un dispositif conçu pour recueillir par l'absorption de l'énergie rayonnée, provenant du soleil, et la transmettre à un fluide caloporteur. L'absorbeur, élément principal du convertisseur solaire, est la partie concernée par notre étude.

Le bilan d'un convertisseur héliothermique dépend de plusieurs paramètres comme les propriétés optiques de l'absorbeur $(\alpha, \varepsilon, \lambda_c)$, la température de la surface absorbante, T , la concentration du rayonnement, C , le coefficient de transfert convectif de chaleur, h , etc. La conception d'un convertisseur de l'énergie solaire nécessite une analyse a priori qui ne peut être effectuée qu'à partir d'un modèle mathématique permettant d'évaluer l'influence des divers paramètres caractéristiques influençant sa performance.

Nous avons effectué une méthode générale du bilan thermique faisant intervenir le paramètre de la sélectivité de la surface absorbante et le coefficient de la concentration du rayonnement solaire.

Chapitre 02

Etude théorique d'un convertisseur héliothermique

Etude théorique d'un convertisseur héliothermique

Introduction

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables au premier rang parmi lesquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

On s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles et le nombre d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir prévu un budget pour la maintenance des équipements. [14]

L'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduites et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux autres sources d'énergie conventionnelles. A notre échelle, l'énergie solaire est inépuisable propre, qui peut favoriser un développement durable, non polluante, gratuite, et elle ne produit aucune vapeur toxique ou déchets nocifs, aucun bruit, aucun gaz qui endommage la couche d'ozone ou pollue l'air que l'on respire.

I/Rappels sur les transferts de chaleur

Les phénomènes d'énergies solaires sont multiples on observe le phénomène de transfert par conduction au sein du corps de l'absorbeur, le phénomène de convection naturelle ou forcée à la surface de la couverture ainsi que le mode de rayonnement.

I-1/la conduction

L'équation fondamentale de la chaleur par conductibilité en régime transitoire quand le corps est immobile avec $\lambda = \text{constante}$ est :

$$a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Avec $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ c'est la diffusivité thermique du corps.

ρ : Masse volumique [Kg/m^3]

c : la chaleur massique [$\text{j}.\text{Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

En régime permanent ou stationnaire on a :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Application pour un mur simple :

Soit un mur vertical dont l'aire de la surface parallèle au plan (Y.Z) en A, et d'épaisseur e. Les deux parois sont maintenues aux températures différentes T_1 et T_2 .

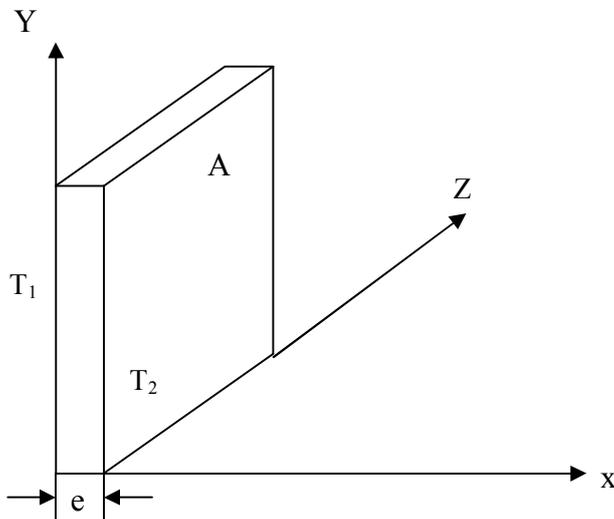


Fig.2.1 un mur d'aire A et d'épaisseur mince e

Si e est faible par rapport aux autres dimensions on obtient un phénomène unidimensionnel donc l'équation (2-1) se réduit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow T = Cx + D$$

Avec les conditions aux limites $T(x=0) = T_1$ et $T(x=e) = T_2$ on obtient :

$$T = \frac{T_2 - T_1}{e}x + T_1$$

Il vient que la quantité de chaleur qui traverse ce mur est :

$$q = \frac{-\lambda}{e}(T_2 - T_1)At \tag{2.2}$$

Soit la densité de flux :

$$\varphi = \frac{q}{At} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e} = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2)$$

Application pour un cylindre, on obtient :

$$\varphi = \frac{2 \pi \lambda}{\ln \frac{R_2}{R_1}} (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

I-2/Echange de chaleur par convection

C'est le transfert de chaleur entre un fluide et un solide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Soit une paroi à température moyenne T_p et un fluide en mouvement quelconque au contact de cette paroi.

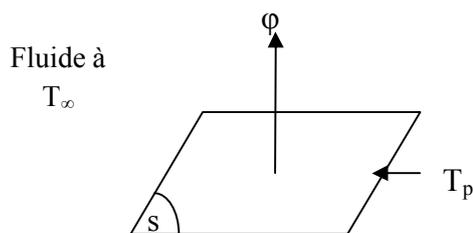


Fig.2.2 Echange de chaleur par convection

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton et la fig.2.2 représente le phénomène :

$$\varphi = hA(T_p - T_\infty) \quad (2.4)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h: coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m^2K)

T_p : température de la surface solide (K)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface solide (K)

A : aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

- la convection est dite **forcée** si le fluide est mis en mouvement par une action extérieure (pompe, ventilation, vent...).
- La convection est dite **naturelle** si le mouvement du fluide ne résulte que des différences de masse volumique induite par des différences de températures.
- La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection, h , est fonction de la nature du fluide, de sa vitesse, de sa température et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

I-3/ Rayonnement thermique

C'est le transfert d'énergie par l'intermédiaire des ondes électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). La figure 2.3 représente ce mode de transfert.

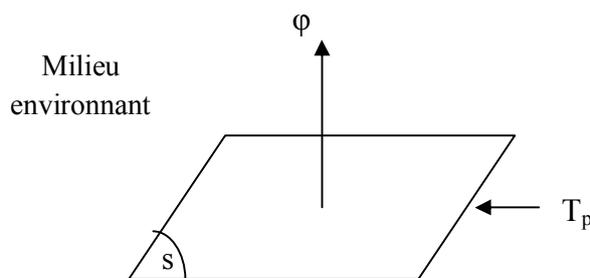


Fig.2.3 Echange de chaleur par rayonnement

Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p A (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (2.5)$$

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : La constante de Stefan ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)

ε_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

A : aire de la surface (m^2)

I-3-1/ Classification des grandeurs physiques selon la composition spectrale

Si la grandeur est relative à l'ensemble du spectre elle est dite totale.

Si elle concerne un intervalle spectral étroit $d\lambda$ autour d'une longueur d'onde λ elle est dite monochromatique : G_λ .

On distingue deux types de grandeurs physiques qui caractérisent le rayonnement : [15]

I-3-1-1/Grandeurs totales de l'énergie rayonnée

Ce sont des grandeurs qui s'étendent sur l'ensemble des longueurs d'onde du spectre

A/ Flux énergétique

Le flux émis par une source est une puissance rayonnée dans tout l'espace entourant cette source. Il est appelé flux total lorsqu'il s'étend sur tout le spectre.

On notera $d^2\phi$, le flux émis par ds dans tout l'espace par :

$$d\phi = \int_{\Omega} d^2\phi = \int d^2\phi \text{ et } \phi = \int_s d\phi = \int_{\Omega} d\phi_x \quad (2.6)$$

B/ Luminance

Le flux émis par ds centrée en O de normale n_1 dans une direction donnée est:

$$d^2\phi = L(\theta, \varphi) ds d\Omega \cos \theta \quad (2.7)$$

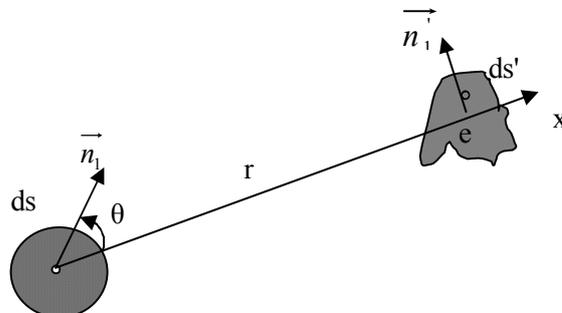


Fig.2.4 schéma représente les termes de l'équation (2.7)

Où $L(\theta, \varphi)$ est la luminance du rayonnement, elle caractérise la direction, (θ, φ) dans l'espace.

Si ds émit vers ds' centrée en e on a :

$$d^2\phi = L(\theta, \varphi) \frac{ds ds' \cos \theta \cos \theta'}{r^2} = L(\theta, \varphi) ds' \cos \theta d\Omega'$$

Car

$$d\Omega = \frac{ds' \cos \theta'}{r^2} \text{ Et } d\Omega' = \frac{ds \cos \theta}{r^2}$$

C/ Intensité énergétique élémentaire

On appelle dI, l'intensité élémentaire d'énergie émise par ds dans la direction x, la grandeur (Figure.2.5):

$$dI = \frac{d^2\phi}{d\Omega}$$

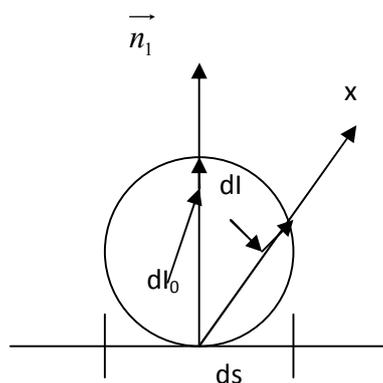


Fig.2.5 l'intensité énergétique élémentaire

Si ds émit d'une façon isotrope c'est-à-dire $L(\theta, \varphi)$ ne dépend de la direction alors:

$$L(\theta, \varphi) = \text{constante}$$

D'où

$$dI = L ds \cos \theta = dI_0 \cos \theta \tag{2.7}$$

Lorsque l'indicatrice de dI (graphe tracé dans un repère polaire (fig.2-5) est sphérique on dit que le corps suit la loi de Lambert.

D/ Émittance énergétique

C'est le flux émis dans l'espace par unité de surface et on la note par M qui est défini par:

$$M = \frac{d\phi}{ds} = \int L(\theta, \varphi) d\Omega \cos\theta \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.8)$$

Si on a une sphère de rayon unité on a $d\Omega = ds$ et $L = \text{constante}$ alors :

$$M = L \iint_s ds \cos\theta = L \iint_s ds' = L\pi R^2 = L\pi \quad (2.9)$$

C'est la loi de Lambert qu'elle montre que l'émittance et la luminance sont proportionnelles.

E/Eclairement énergétique

C'est le flux reçu par unité de surface ds' venant de tous les émetteurs, alors on écrit :

$$E = \frac{d\phi_r}{ds'} \quad (2.10)$$

Ou ds' est la surface réceptrice.

Il caractérise alors le récepteur et dépend des émetteurs qui se trouvent autour de ds' .

$$dE = \frac{d^2\phi_r}{ds'} = \frac{d^2\phi_r}{d\Omega} \cdot \frac{\cos\theta'}{r^2} \quad \text{Si } \frac{dI}{r^2} = \text{constante on a :}$$

$$dE = dE_0 \cos\theta' \quad (2.11)$$

I-3-1-2/Grandeurs monochromatiques

Ce sont des grandeurs relatives à un intervalle de longueur d'onde du spectre.

Soit une grandeur qui varie avec λ on définit une fonction monochromatique par :

$$\varphi_\lambda = \frac{d\phi_\lambda}{d\lambda} \quad (\text{W/m}) \quad \text{Donc } \phi = \int_0^\lambda \varphi_\lambda d\lambda$$

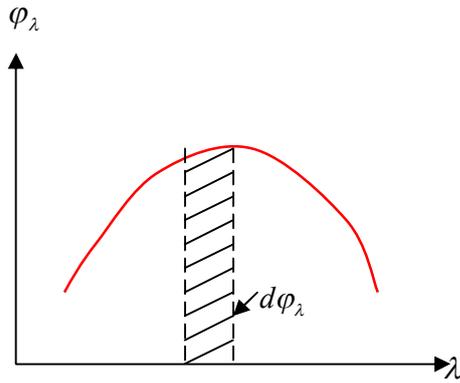


Fig.2.6 la fonction monochromatique φ_λ en fonction de λ

I-3-1-3/Absorption, réflexion, transmission

A/facteurs monochromatiques directionnels

On désigne le facteur monochromatique par:

$$d^2\phi_{\lambda,i} = L_{\lambda,i} ds \cos\theta d\Omega$$

$d^2\phi_{\lambda,i}$ est le flux incident sur un élément de surface ds .

$d^2\phi_{\lambda,\rho}$ Le flux réfléchi d'une manière spéculaire

$d^2\phi_{\lambda,\alpha}$ Le flux absorbé

$d^2\phi_{\lambda,\tau}$ Le flux transmis

On définit l'absorptivité monochromatique directionnelle par :

$$\alpha'_\lambda = \frac{d^2\phi_{\lambda,\alpha}}{d^2\phi_{\lambda,i}}$$

Ainsi que la transmissivité

$$\tau_{\lambda,i} = \frac{d^2\phi_{\lambda,\tau}}{d^2\phi_{\lambda,i}}$$

On définit aussi la réflexivité monochromatique directionnelle hémisphérique par:

$$\rho_{\lambda}' = \frac{d^2 \phi_{\lambda, \rho}}{d^2 \phi_{\lambda, i}}$$

Si on s'intéresse uniquement à une fraction d'énergie qui se réfléchit dans une direction donnée, on parle de la réflectivité bidirectionnelle monochromatique (Figure.2.8):

$$\rho_{\lambda}'' = \rho_{\lambda}''(\vec{i}, \vec{r}) = L_{\lambda, r}''(\vec{i}, \vec{r}) / L_{\lambda, i} \cos \theta d\Omega$$

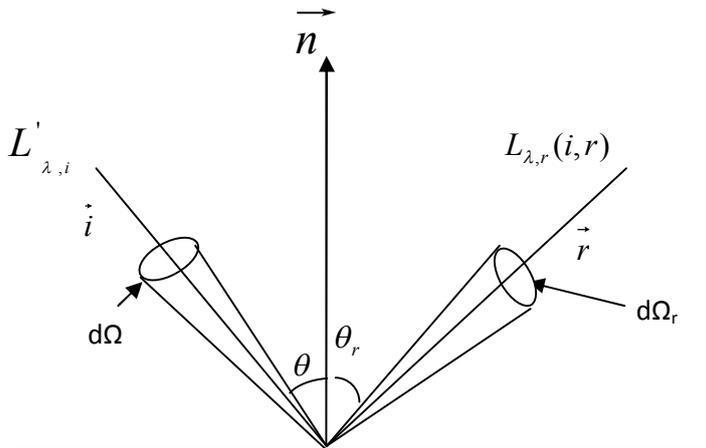


Fig.2.8 la luminance reçu et réfléchis

La réflectivité monochromatique directionnelle hémisphérique:

$$\rho_{\lambda}^{\Omega}(\theta, \varphi) = \frac{\int L_{\lambda}''(r, i) \cos \theta d\Omega}{\int L_{\lambda}(i) \cos \theta d\Omega}$$

De la on tire:

$$\rho_{\lambda}^{\Omega}(\theta, \varphi) = \int_{\Omega} \rho_{\lambda}'' \cos \theta_r d\Omega_r$$

B/Emissivité monochromatique directionnelle

C'est le rapport de la luminance monochromatique d'un matériau de température T dans une direction donnée déterminée par $\Delta(\theta, \varphi)$ à celle du corps noir dans les mêmes conditions, ainsi:

$$\varepsilon'_\lambda = \frac{L_\lambda(\theta, \varphi, T)}{L_\lambda^0(\lambda, T)}$$

C'est une caractéristique du matériau.

Pour chaque valeur de λ et de température T et dans une direction donnée l'absorptivité et l'émissivité monochromatique directionnelle sont égales:

$$\varepsilon'_\lambda = \alpha'_\lambda$$

C'est la loi de Draper ou 2ème loi de Khertchoff

C'est-à-dire qu'à l'équilibre parfait chaque ds émet dans la direction Δ un flux monochromatique égal au flux qui l'absorbe dans cette direction.

Soit

$$L_\lambda(\theta, \varphi) ds \cos \theta d\Omega = \alpha'_\lambda(\theta, \varphi) L_\lambda^0 ds \cos \theta d\Omega \Rightarrow L_\lambda(\theta, \varphi) = \alpha'_\lambda L_\lambda^0$$

\longleftrightarrow \longleftrightarrow
 Flux émis par ds flux absorbé

Si

$$\varepsilon'_\lambda = 1 \text{ et } \alpha'_\lambda = 1 \text{ alors ds est un corps noir.}$$

C/émissivité totale directionnelle

Elle est définie par:

$$\varepsilon' = \frac{L(\theta, \varphi, T)}{L^0(T)} = \frac{\int_0^\infty L_\lambda(\theta, \varphi, T) d\lambda}{\int_0^\infty L^0(T) d\lambda} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon'_\lambda L_\lambda^0 d\lambda}{\int_0^\infty L^0(T) d\lambda}$$

D'autre part

$$\varepsilon' = \frac{\int_0^\infty \alpha'_\lambda L'_\lambda(\theta, \varphi, T) d\lambda}{\int_0^\infty L_{\lambda, t} d\lambda}$$

Ce qui implique que

$$L_{\lambda,i}(i) = \frac{\varepsilon'}{\alpha} L_{\lambda}^0 = k L_{\lambda}^0$$

Si $k = 1 \Rightarrow \alpha' = \varepsilon'$

α' et ε' Sont égales indépendamment de λ , la surface est dite grise.

II/ la concentration géométrique et la concentration énénergétique

La concentration énergétique nous permet d'obtenir un rendement et d'optimiser l'appareil récepteur. [15]

Si l'éclairement est constant pour la température T on a l'énergie:

$$w = L s_r \Omega$$

L: la luminance du miroir

Le miroir reçoit $s_m \Omega L_s$

$$E_r = \frac{w}{s_r}, E_r = \frac{L s_r \Omega s_m}{s_r} = L \Omega s_m$$

s_r : La surface du récepteur.

$$L \Omega = E_m \quad \left(\text{Car } \frac{w}{s_m} = E_m \right)$$

Donc

$$E_r = \frac{s_m}{s_r} E_m \Rightarrow E_r s_r = E_m s_m \quad \frac{E_r}{E_m} = \frac{E_r}{E_s} = \frac{s_m}{s_r} = c = c_g$$

Si l'éclairement n'est pas constant on a :

$$s_m = \int_{s_r} \frac{E_r ds_r}{E_s} \Rightarrow c_g = \frac{s_m}{s_r} = \frac{1}{s_r} \int_{s_r} \frac{E_r(\vec{r})}{E_s} ds_r$$

Donc

$$C_g = \frac{S_a}{S_a} \frac{(miroir)}{(recepteur)}$$

$$\text{Et } \frac{E_r(\vec{r})}{E_s} = C(\vec{r})$$

$$\text{Donc } C_g \neq C(\vec{r})$$

III/ Aperçu sur l'énergie solaire

Le soleil est une sphère gazeuse composé presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 Km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes [14].

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent.

Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes d'hydrogène en 560.106 tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui présente une énergie totale de 36.10^{26} KW.

La terre étant à une distance de 150.10^6 Km du soleil, elle reçoit une énergie de $1,8.10^{17}$ W.

La valeur du flux de rayonnement solaire G reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance terre/soleil.

Sa valeur moyenne G_0 est appelée la constante solaire, elle vaut $G_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ en 1ère approximation, on peut calculer la valeur de G en fonction de numéro du jour de l'année j par:

$$G = G_0 [1 + 0.033 \cos(0.984j)]$$

On trouvera sur la figure 2.13 la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.

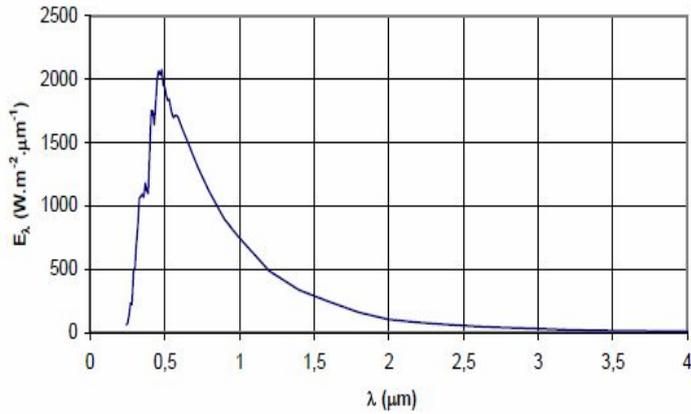


Fig.2.13 Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.

On notera que 98% du rayonnement solaire est émis dans les longueurs d'onde inférieures à 3 μm . En premier approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777K.

III-1/rayonnement solaire au sol

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit:

- **le rayonnement direct** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- **Le rayonnement diffus** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules liquides ou solides en suspensions dans l'atmosphère. Il n'a pas de directions privilégiées.

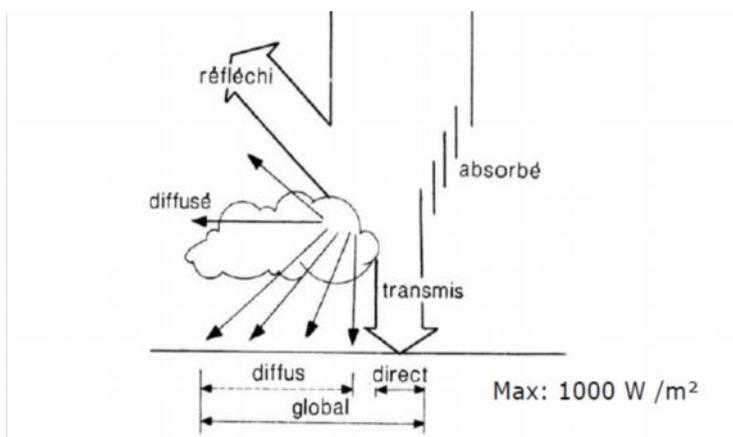


Fig.2.14 Schéma du rayonnement direct, diffus et global

- **Le rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus.

***Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale [14]**

- Irradiation solaire (énergie reçue pendant une certaine durée)

S: directe, D: diffuse, G: globale, $G=S+D$.

- Eclairement solaire (flux instantané)

S^* : direct, D^* : diffuse, G^* : global, $G^* = S^* + D^*$.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I.

Nous désignerons par:

I: l'énergie reçue (irradiation) en W/m^2

I^* : le flux reçu (éclairement) en W/m^2

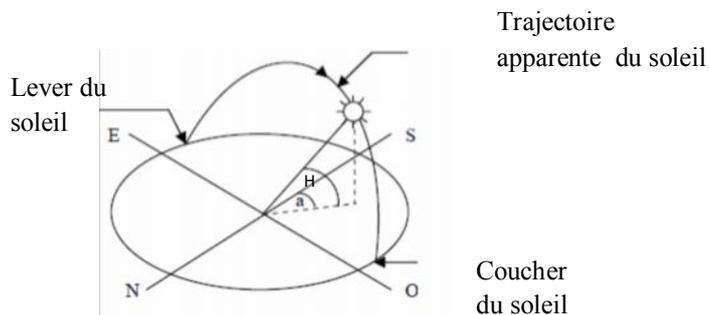


Fig.2.15 Repérage de position du soleil

Nous avons la relation:

$$S^* = I^* \sin(H) \quad (2.12)$$

H: La hauteur du soleil; c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

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.

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude 'l' du lieu

- La date j (numéro du jour de l'année)
- L'heure solaire 'TS 'dans la journée

A/le rayonnement direct

A.1/l'éclairement S*

L'éclairement solaire direct S* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles:

- Par mesure de G* et D*, on en déduit: S* = G* - D*.
- A partir de la mesure des irradiances journalières globales G et diffuse D sur un plan horizontal, on en déduit: S=G-D et S* par la fonction de répartition suivante:

$$S^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi\omega_1}{180} \cos(\omega_1)} S$$

Où: $a = 0.409 + 0.502 \sin(\omega_1 - 60^\circ)$

$$b = 0.661 - 0.477 \sin(\omega_1 - 60^\circ)$$

ω : L'angle horaire

ω_1 : Le module de l'angle horaire au lever du soleil.

- A partir de la mesure de l'irradiation journalière globale G, on évalue l'irradiation journalière diffuse D par:

$$\left\{ \begin{array}{ll} D = 0.996 & K_T \leq 0.17 \\ D = (1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.865K_T^3 + 14.648K_T^4)G & 0.17 \leq K_T \leq 0.75 \\ D = (-0.54 + 0.632)G & 0.75 < K_T \leq 0.80 \\ D = -0.2G & K_T \geq 0.80 \end{array} \right. \quad (2.13)$$

$$\text{Où } K_T = \frac{G}{G_0} \quad (2.14)$$

G_0 étant l'irradiation journalière globale G , on évalue l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au dessus de l'atmosphère calculable par:

$$G_0 = 3.795 \times 10^4 \cos(L) \cos(\delta) \left[\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1) \right] \quad (2.15)$$

Où ω_1 en degré et G_0 en Kj.m^{-2} .

On calcule ensuite $S=G - D$ et on est ramené au cas précédent.

δ : déclinaison, L la latitude.

- Si on ne dispose d'aucune mesure; on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation [14]:

$$I^* = 1370 \exp\left[-\frac{TL}{0.9 + 9.4 \sinh}\right] \quad (2.16)$$

TL : le facteur de trouble de Linke calculable par:

$$TL = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln(P_v) \quad (2.17)$$

β : le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égale à:

$\beta=0.05$ en zone rurale, $\beta=0.1$ en zone urbaine, $\beta=0.2$ en zone polluée.

P_v la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mm Hg.

On en déduit $S^* = I^* \sin H$

A.2/l'irradiation directe journalière S

L'irradiation S sur un plan horizontal peut être déterminée de plusieurs manières en fonction de données disponibles:

- Par mesure directe de G et D on en déduit: $S=G-D$.
- A partir de G , on calcule D par la formule $D=G-S$ et on est ramené au cas précédent.
- A partir de la mesure du taux de l'ensoleillement s puis on évalue G par la formule et on est ramené au cas précédent.

- Par intégration sur la journée des valeurs de $S^* = I^* \sin(H)$, I^* étant calculé par la formule (2.16).

B/le rayonnement diffus

B.1/l'éclairement D^*

L'éclairement solaire diffus D^* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles:

- Par mesure directe.
- A partir de la mesure de l'irradiation journalière diffuse, D , sur un plan horizontal et on déduit:

$$D^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi\omega_1}{180} \cos(\omega_1)} D \quad (2.18)$$

- Par utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure:

$$D^* = 54.8 \sqrt{\sin(H)} [TL - 0.5 - \sqrt{\sin(H)}] \quad (2.19)$$

Où TL est le facteur de trouble de Linke calculable pour (2.17).

B.2/l'irradiation D

L'irradiation diffuse journalière D sur un plan horizontal peut déterminer de plusieurs manières en fonction des données disponibles:

- Par mesure directe
- A partir de la mesure de l'irradiation globale G sur un plan horizontal: on évalue D par la formule:

$$D = \{0.775 + 0.00606(\omega_1 - 90^\circ) - [0.505 + 0.00455(\omega_1 - 90^\circ)] \cos(115K_T - 103)\} G$$

- A partir de la mesure de taux d'ensoleillement σ , on évalue G par la formule:

$$G = G_0 [0.29 \cos(l) + 0.52\sigma] \quad \text{Zone tropicale}$$

$$G = G_0 [\sqrt{2\sigma + 1} - 0.72] \quad \text{La zone d'Algérie des Aurès}$$

Et on est ramené au cas précédent.

- Par intégration des valeurs de D^* données par la corrélation (2.19) en l'absence de toute donnée.

IV/ Les capteurs solaires

IV-1 Définitions et compositions

On appelle capteur solaire un appareil susceptible de transformer l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique qui peut être utilisée après pour chauffer des locaux, fournir de l'eau chaude sanitaire, sécher les grains, faire fonctionner des moteurs thermiques...

Il y a plusieurs types des capteurs solaires thermiques; et dans notre étude on a fait une étude approfondie sur les capteurs plans les plus fréquents utilisant l'eau ou l'air comme fluide caloporteur.

Ces capteurs sont d'un principe très simple et se composent généralement de:

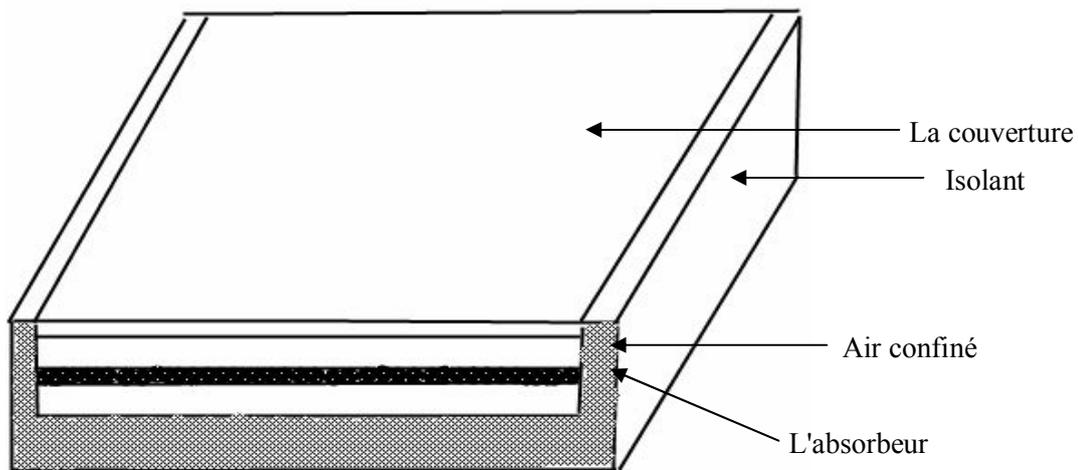


Fig.2.16 Coupe schématique d'un capteur

IV-1-1 la couverture de vitre

Elle est transparente, formée de verre ou de plastique. Les avantages de ce dernier sont: le poids réduit et l'absence de fragilité, et ses inconvénients sont: faible résistance aux agents atmosphériques comme la pluie, la neige..., pour cela il est moins utilisé.

Le rôle de la couverture est essentiellement d'augmenter l'effet de serre au voisinage d'une isolation de la face avant de l'absorbeur et elle doit avoir les propriétés suivantes:

- ❖ Transmettre le maximum d'énergie dans l'environnement de l'absorbeur.
- ❖ S'oppose à tous échange d'échange inverse c'est-à-dire l'absorbeur vers l'extérieur.
Ces propriétés concernent tous les échanges qu'ils soient convectifs ou radiatifs.
- ❖ Le choix des matériaux convenables à l'utilisation dépend de:
 - ✓ Leur résistance aux températures de fonctionnement courantes
 - ✓ La permanence dans le temps, la conductibilité reste constante
 - ✓ La résistance au choc qui modifie la répartition des produits utilisés dans la couche isolante

IV-1-2 L'absorbeur

Un revêtement sélectif appelé absorbeur, c'est un élément essentiel du capteur solaire, il sera réalisé d'un matériau de bon conductivité thermique, présentant une surface ayant un coefficient d'absorption α .

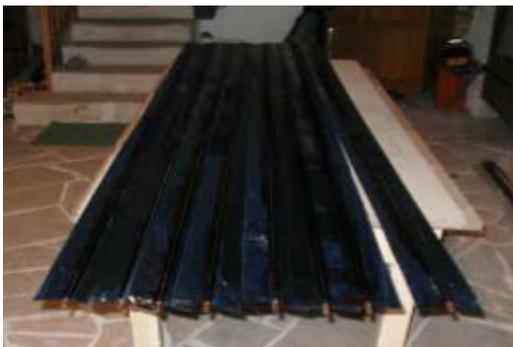


Fig.2.17 l'absorbeur solaire [16]

Il doit assurer les conditions suivantes :

- ❖ Intercepter le maximum de rayonnement solaire incident (direct et diffus).
- ❖ Absorber la plus grande partie de rayonnement.
- ❖ Transmettre cette chaleur vers le fluide caloporteur.
- ❖ Avoir le minimum d'échange thermique vers le milieu par émission.
- ❖ Il devra être le plus léger possible afin d'éviter l'inertie mis en régime et construit avec un matériau de bonne conductibilité thermique.
- ❖ D'autre part, il doit répondre aux exigences économiques. Généralement les absorbeurs sont réalisés avec des feuilles minces de matériaux qui présentent une bonne conductibilité thermique et une bonne tenue mécanique mais ils présentent un coefficient d'absorption faible.

Pratiquement toutes les peintures utilisées sont des corps gris et leur comportement est voisin du corps idéal.

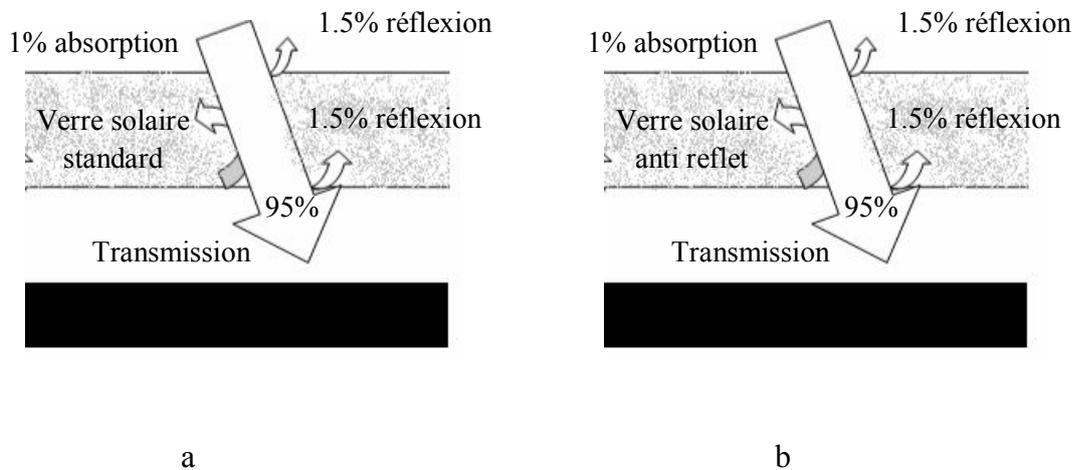


Fig.2.18 le vitrage au-dessus de l'absorbeur : a- un verre solaire standard b- un verre solaire antireflet

Mais la peinture noire mate est généralement admise comme la meilleure solution pour obtenir des absorptions élevées. Cependant il y a lieu de remarquer que d'autres couleurs présentent des valeurs assez voisines à ces dernières.

IV.1.3 Fluides caloporteur

Ces fluides ont pour rôle de véhiculer la chaleur entre l'absorbeur et l'utilisateur ou le stockage.

On utilise principalement deux classes des fluides :

☒ L'air

Dont les avantages évidents sont l'abondance et la gratuité qui a pour principal handicap sa faible capacité calorifique. Il faut environs 300 litres d'air pour véhiculer autant d'énergie qu'un litre d'eau.

☒ L'eau

L'eau n'est pas seulement bon marché. Elle possède des propriétés qui en font un excellent fluide caloporteur par sa chaleur massique élevée, sa densité et sa faible viscosité.

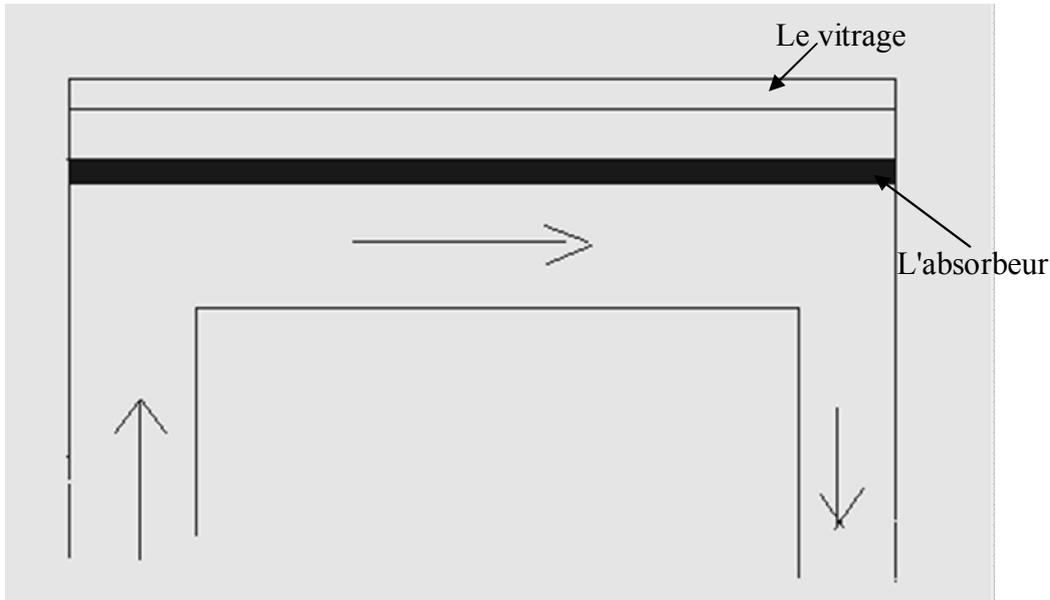


Fig.2.19 Le réseau du fluide caloporteur

IV.1.4 le circuit d'échangeur

Ce circuit doit être lié à l'absorbeur et souvent fait partie de l'ensemble de l'absorbeur. Son rôle consiste à transférer la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur dans les meilleures conditions.

La géométrie du circuit dont lequel circule le fluide caloporteur a une importance considérable. Il est nécessaire d'assurer une irrigation parfaite de l'absorbeur et d'avoir un transfert rapide entre le fluide caloporteur et l'absorbeur, d'éviter les zones chaudes et d'améliorer le rendement.

IV.1.5 L'isolation arrière et latérale

- les isolants utilisés sont généralement : la laine de verre, les mousses de polyuréthane.
- Les matériaux utilisés doivent avoir une conductivité thermique la plus faible.
- Leurs caractéristiques doivent être permanentes dans le temps.

- Certains produits (laine) présente un tassement qu'on doit lutter.
- Certains produits (laine) sont sensibles à l'humidité (pluie...) donc il faut avoir une étanchéité
- Certains produits (laine) doivent résister au feu et au rongeur.
- Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement qui dépassent largement les 100°C pour les capteurs modernes, dans certains cas (capteur en stagnation). [1]



Fig. A.B.C Les types des isolations [17]

A. la laine minérale non inflammable

B. Isolation d'un champ de capteurs avec de la laine de roche semi-rigide

C. Mousse de polyuréthane

- une isolation en partie inférieure pour éviter les pertes thermiques à l'arrière du capteur.

Quelques données relatives aux matériaux d'isolation arrière

Désignation	Conductivité thermique $W.m^{-1} . ^\circ C^{-1}$	Masse volumique $Kg.m^{-3}$	T° max °C	observation
Laine de verre	0.050	70	/	Sensible à l'humidité (pare vapeur)
Laine de roche	0.050	80-150	150	/
Mousse de verre	0.057	123	150	/
Liège expansé	0.042	95	110	/
	0.074	105	110	
Polystyrène	0.042	15	85	Moulé comprimé
	0.040	17	85	
	0.035	35	85	
Polyuréthane	0.027	35-45	110	Mousse

Ces valeurs correspondent à la température de 50°C: C'est la température moyenne d'utilisation dans les convertisseurs héliothermiques à basse température.

Le choix des matériaux convenables à l'utilisation dépend de:

Leur résistance aux températures de fonctionnement courantes.

- ✓ La permanence dans le temps de leurs caractéristiques (absence du vieillissement avec le temps, conductibilité thermique reste constante).
- ✓ Résistance au choc qui modifie la répartition des produits utilisés dans la couche isolante.
- ✓ Degrés de résistance à l'humidité, à l'eau de pluie (laines).
- ✓ Résistance au feu, aux rongeurs et insectes etc.

IV-2 Les types des capteurs solaires

Il existe trois types de panneaux solaires thermiques :

IV-2-1/ Les capteurs plans non vitrés dit " capteur moquette "

Ce sont de longs tubes de couleur noire, qui piège le mieux la chaleur, qui sont en plastique ou en métal, dans lesquels circule de l'eau. Ces capteurs sont bien adaptés pour le chauffage des piscines. [18]



Fig. 2.20 Capteurs solaires sans vitrage (capteur moquette). [19]

IV-2-2 Les capteurs plans avec vitrage

Ils comprennent un caisson isolant au-dessus duquel est fixée une vitre en verre ou en plastique. A l'intérieur, une feuille métallique noire absorbe l'énergie rayonnée et qui est emprisonnée dans le caisson. Cette chaleur est transmise à un autre fluide caloporteur qui ne gèle pas en hiver. Ce fluide caloporteur circule librement dans des tuyaux vers le point d'utilisation. L'élévation de température par rapport à la température de l'air ambiant peut atteindre $+70^{\circ}\text{C}$. C'est l'idéal pour produire de l'eau chaude pour la maison ou pour le chauffage de tous les types de bâtiments. [20]

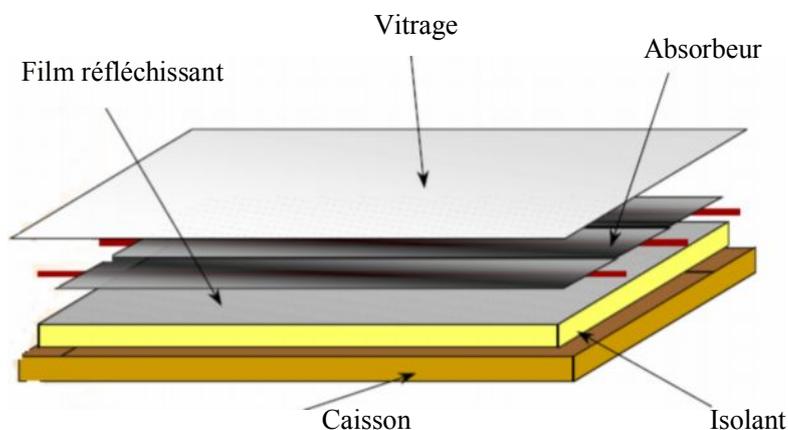


Fig. 2.21 Composants types d'un capteur plan [17]

IV-2-3/Les capteurs sous vide

Ils se présentent sous la forme d'un panneau où sont alignés une série de tubes de verre transparent. Dans ces tubes, on a fait du vide, qui est un des meilleurs isolants thermiques existants. Dans chaque tube, un absorbeur capte la chaleur solaire et un système d'échangeur de chaleur et la transmet à un fluide caloporteur. Comme pour les autres capteurs, ce fluide circule vers les points d'utilisation. La température peut s'élever jusqu'à 100-140° C. Ces capteurs sont adaptés aux applications industrielles qui nécessitent de hautes températures.

Le système de circulation comporte une pompe de circulation ou un thermosiphon. Ce dernier joue sur le fait que l'eau chaude est plus légère que l'eau froide. Dans un circuit de tuyaux verticaux, l'eau chaude monte d'elle-même et l'eau froide descend.

Un thermosiphon ne peut fonctionner que si le point d'utilisation de l'eau chaude est situé au-dessus du capteur. Le système de régulation est équipé de sondes de mesure de la température et d'un thermostat contrôlant la mise en route ou l'arrêt de la pompe de circulation.

Les capteurs sous vide sont parmi les plus efficaces et parmi les types les plus coûteux des capteurs solaires. Tout comme pour les capteurs solaires de types vitrés, les applications des capteurs sous vide sont utilisés pour le chauffage de l'eau des résidences des bâtiments commerciaux, le chauffage des bâtiments, ainsi que celui des piscines intérieures.[19]



Fig.2.22 Capteurs sous vide [21]

Les capteurs sous vide possèdent un absorbeur sélectif et perdent peu de chaleur, même dans les régions froides.

IV-3/Le principe de fonctionnement d'un capteur thermique

La chaleur est récupérée grâce à un fluide thermique (air ou fluide antigel spécifique tenant à -25°C qui s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage. Celui-ci laisse pénétrer la lumière solaire et bloque le rayonnement infrarouge qui est réémis par l'absorbeur chaud : c'est l'effet de serre. Le capteur solaire est d'autant plus performant que le revêtement de l'absorbeur a un coefficient d'absorption élevé et un coefficient d'émission faible. Les matériaux qui présentent ces caractéristiques sont dits "sélectifs".

Aujourd'hui, pour des raisons de coût, le choix s'est porté sur du chrome noir déposé électrochimiquement sur une plaque de cuivre. [11]

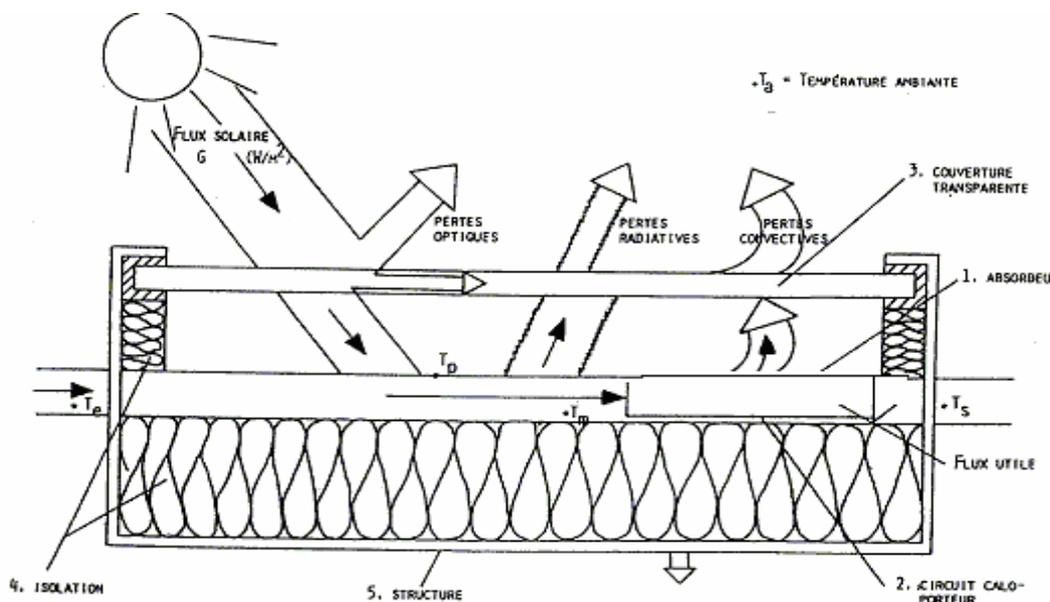


Fig2.23 principe de fonctionnement [22]

Effet de serre

L'effet de serre provient de son utilisation initiale dans les serres où l'on peut faire cultiver des plantes exotiques dans des climats froids.

Vers les années 1769 H.B Saussure est le premier à utiliser un dispositif proche d'un capteur thermique. En disposant de 5 boîtes en verre les unes sur les autres, il parvient à obtenir une température de 160°C à l'intérieur de la boîte.

En 1857 Sir John Herschel [15], en disposant de deux plaques divers sur du sable, parvient à obtenir une température de 120°C . Telles sont les premières descriptions connues des capteurs solaires thermiques qui montrent que pour obtenir cet effet on dispose un vitrage sur un capteur.

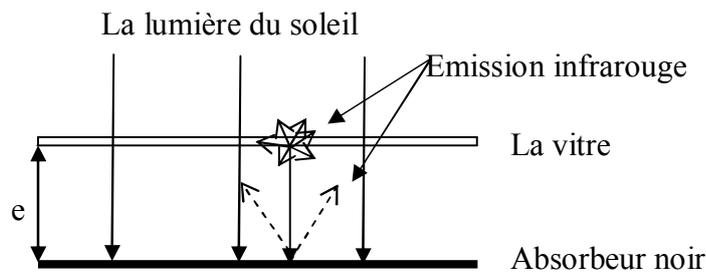


Fig.2.24 schéma explicatif d'effet de serre

II-4 Choix de l'orientation et de l'inclinaison du capteur

Le choix de l'orientation et de l'inclinaison des capteurs peut être guidé par des préférences architecturales, cependant d'une manière optimale, les capteurs sont orientés plein sud (dans l'hémisphère nord) avec une inclinaison proche de 45° . Prenons un exemple pour une habitation placée à une latitude de 45° :

On sait que l'inclinaison de l'axe de la terre est de $23^\circ 5'$. Cela signifie que la déclinaison du soleil à midi sera de 45° aux équinoxes de printemps et d'automne. Il sera de $45^\circ - 23^\circ 5' = 21^\circ 5'$ au solstice d'hivers, et de $45^\circ + 23^\circ 5' = 68^\circ 5'$ au solstice d'été. Donc, l'angle formé par le soleil avec l'horizontale à une latitude de 45° (Nord ou Sud) oscillera entre $21^\circ 5'$ au plus bas en hivers et $68^\circ 5'$ au plus haut en été.

L'inclinaison peut varier entre 30° et 60° selon que l'on veut privilégier le rayonnement d'été (haut sur l'horizon) ou celui d'hiver (bas sur l'horizon). Bien entendu plus les capteurs se rapprochent de la verticale, plus l'orientation aura de l'importance. La présence de masques (montagnes au lever ou au coucher de soleil) peut aussi influencer l'orientation. [16]

Chapitre 03

Analyse et modélisation des propriétés de l'absorbeur

Analyse et modélisation des propriétés d'absorbeur

Introduction

La définition des propriétés optiques et les méthodes de caractérisation présentées ici concernant les surfaces opaques diffusantes, sont fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident. Le but de l'étude optique des surfaces pratiquement rugueuses et diffusantes, des absorbeurs destinés à la conversion héliothermique, et non seulement de comprendre leur propriétés optiques (l'absorptivité solaire α ou $\alpha'(\theta)$, et l'émissivité ε ou $\varepsilon'(\theta)$) mais aussi plus finement grâce à des mesures spectrales, de comprendre les mécanismes de la sélectivité spectrale de ces surfaces afin de l'optimiser.

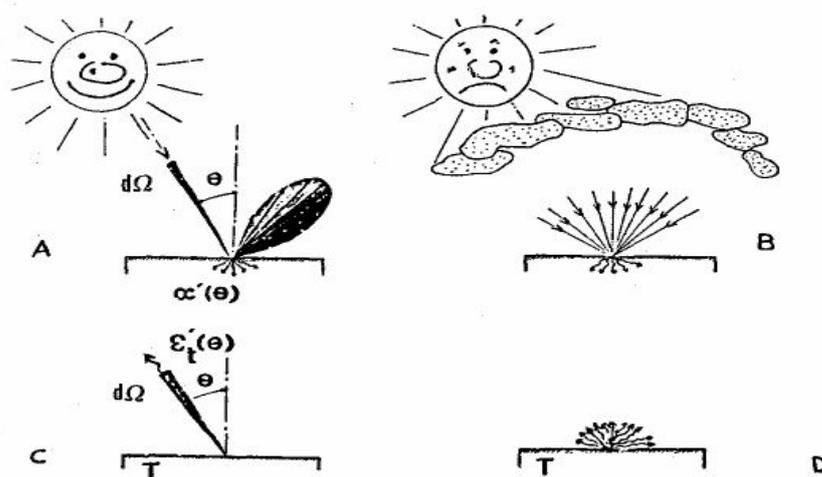


Fig.3.1 Représentation schématique des flux réfléchis, absorbés ou émis par une surface directionnels (A et C) ou hémisphériques (B et D)

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \int \alpha'(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega \quad \text{et} \quad \varepsilon_i = \frac{1}{\pi} \int \varepsilon'_i(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega$$

L'absorptivité et l'émissivité d'une surface dépendent de la répartition spatiale du rayonnement, incident ou émis:

*Si celui-ci tombe sur la surface sous la forme d'un rayonnement quasi parallèle (angle solide faible $d\Omega$), centré sur la direction θ par rapport à la normale, la proportion de l'énergie qui n'est

pas réfléchi par la surface dépend, en générale, de l'angle d'incidence θ et constitue l'absorptivité directionnelle $\alpha'(\theta)$. Cette quantité caractérise les propriétés d'un absorbeur exposé au rayonnement solaire direct.

L'efficacité d'une installation solaire en fonction des propriétés optiques est encore mal définie.

Un récepteur va se situer du point de vue de ses propriétés thermo optiques entre celles d'un absorbeur pour lequel $\alpha = \varepsilon = 1$ et celles du matériau (α_m et $\varepsilon_m < 1$) qui constitue sa paroi.

Si nous admettons que le rayonnement reçu qui vient frapper le récepteur (absorbeur) se réfléchit n fois dans ce dernier avant de s'échapper, observation également mais approximativement valable pour le rayonnement infrarouge réémis, il nous sera possible de déterminer dans ce cas idéal les valeurs de l'absorption globale apparente α_R et de l'émissivité globale apparente du récepteur. [24]

Toujours ne considérant que les pertes radiatives (supposant la convection, et la conduction négligeable).

III.1 La caractéristique microscopique de la surface

Les surfaces ont été caractérisées par la microscopie électronique à balayage et l'analyse de la microsonde électronique. La microstructure de la surface vue par la microscopie à balayage est composée de petites rainures, organisée en un ensemble hétérogène à deux dimensions (en partie de trois dimensions) rainures de la matrice. La largeur des rainures varie généralement entre 1 et 2 μm . En raison de broyage du processus continu, certains des rainures sont plus profondes à bords nets que les autres. La cause la plus probable pendant le meulage des rainures qui sont formés plus tôt du terrain sur plusieurs fois avec des grains de différentes tailles et formes, causant plus tard des rainures qui apparaissent très claires et tranchantes [27]. Les substrats de l'Al sont de 99,5% de pureté. Ils ont été utilisés dans toutes les phases de fabrication. La microsonde électronique met en lumière la surface d'un échantillon d'absorbeur de surface typique soumis à 15mn de broyage, se compose principalement d'Al et O avec quelques traces de C. L'analyse non broyée de l'arrière du même échantillon montre que le processus de broyage ajoute O et C à la surface.

Certains éléments du C mesuré sont dû à la contamination de la poudre de ce dernier au cours de la procédure de rectification, bien que la surface a été nettoyée avec du méthanol avant

l'analyse. Dans les autres analyses de très petites traces de Si, Mn, Fe et Cu ont été détectées. Selon le substrat d'Al fabriqué, ce dernier peut contenir ainsi que le Mg, le Zn et le Ti avec un pourcentage de 0-0.40 avec une teneur maximale différente pour chaque élément, Préalable à l'analyse, la surface a été revêtue d'une très fine couche d'or. [25]

III 2. Caractéristique optique

La microscopie optique a indiqué que la surface est non homogène couverte par une substance foncée, qui a été identifiée comme carbone.

En plus, les différentes nuances de l'obscurité sont évidentes.

L'analyse de la spectroscopie du photoélectron a montré que la surface contient du Al_2O_3 et le carbone sous forme graphite et la microscopie optique a prouvé que la forme graphite non homogène a collectionné les faisceaux sur la surface. [26]

Le graphite est groupé dans quelques secteurs, tandis que dans d'autres secteurs l' Al_2O_3 est découvert. Ce phénomène peut être expliqué avec la nature du processus de fabrication.

L'épaisseur maximum du faisceau de graphite est déterminé pour être dans la gamme de 300nm pour une surface ayant $\alpha = 0.88$ et $\varepsilon = 0.27$.

L'absorption solaire a été déterminée par la mesure de la réflectance spectrale hémisphérique de $0.39\mu m$ à $1,1\mu m$ avec un spectroradiomètre de type LI - COR LI-1800 et une sphère d'intégration et α_λ est calculé pour chaque longueur d'onde. L'émission infrarouge a été déterminée par la mesure spectrale (semi) hémisphérique de réflexion de $2,5$ à $20\mu m$ avec une perspective de type MICAD IR-FTIR spectromètre avec une semi-intégration de dispositif, et ε_λ a été calculée pour chaque longueur d'onde. [28], [25]

Le spectroradiomètre et spectromètre de FTIR ont été utilisés pour la caractérisation optique.

III. 3 Analyse du phénomène de rayonnement

Les surfaces sélectives utilisées dans les installations solaires travaillent avec des concentrateurs du rayonnement, se trouvent portées à des températures élevées, ce qui exige pour leur fabrication non seulement des matériaux aux propriétés optiques convenables présentant un bon rendement de conversion, mais aussi des matériaux aux propriétés mécaniques suffisantes ne

présentant qu'une faible dégradation thermique dans le temps, assurant ainsi à la surface une longue durée de vie. [9]

Pour ces surfaces, les pertes radiatives auront une importance plus ou moins grande, suivant le rapport température d'utilisation-concentration.

En effet dans un système pour lequel nous ne faisons intervenir que les pertes radiatives négligeant volontairement les pertes par convection et conduction, une partie de l'énergie rayonnée est réfléchiée R.

De la partie absorbée A, une partie est réémise par la surface sous forme de radiations infrarouges, laissant une énergie utile, ϕ_u

$$\text{Avec } G^* = R + A$$

$$\text{Et } A = E + \phi_u$$

-L'énergie rayonnée égale à la constante solaire (G_0) multipliée par le facteur de concentration(C)

- L'énergie absorbée A représente l'énergie rayonnée moins l'énergie perdue par réflexion, et qui s'exprime:

$$A = G^* - R = \alpha G^*$$

Où α est le pouvoir d'absorption de la surface

- L'énergie thermique réémise E sous forme de radiation infrarouge est en fonction du pouvoir émissif (ϵ) de la surface à la température T conformément à la loi de Stephan Boltzmann

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

De sorte que le rendement photo thermique (η) de la surface devient

$$\eta = \frac{\phi_u}{I} = \alpha - \frac{\epsilon \sigma T^4}{S C}$$

Afin de trouver un absorbeur optimal, on doit analyser et modéliser ses propriétés radiatives.

Dans un convertisseur héliothermique, l'absorbeur est l'élément qui est typiquement solaire.

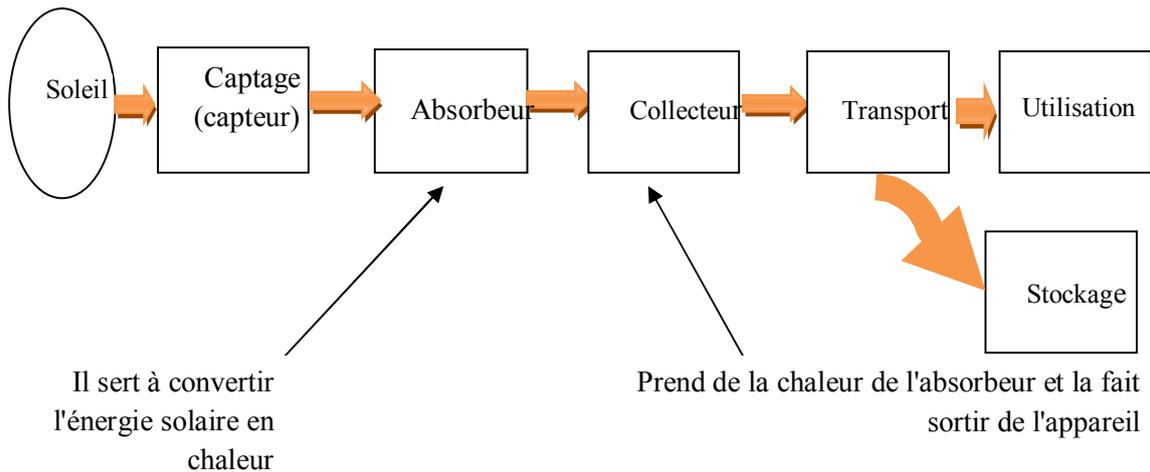


Fig.3.2 Schéma de principe de conversion

Exemple de l'application de l'énergie solaire au pompage

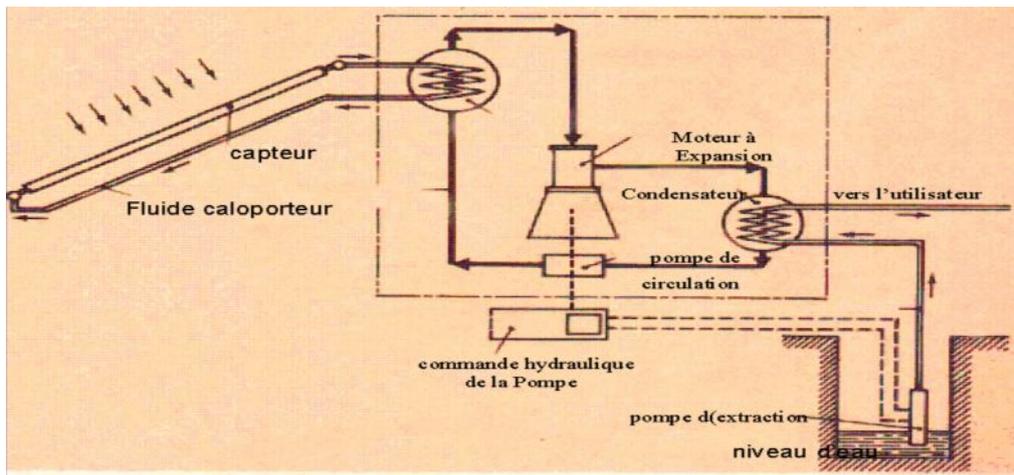


Fig.3.3 Exemple de pompage solaire

III-3-1/ Etude de l'absorbeur

On dispose d'une plaque portée à la température T qui est exposée aux rayons solaires.

La puissance incidente du soleil est noté G^* et on suppose que la température de la plaque, pour simplifier, est égale à celle du fluide caloporteur.

On suppose aussi que l'absorbeur possède le facteur total d'absorption α et le facteur total d'émission ϵ .

D'autre part l'énergie émise par l'environnement est absorbée avec le facteur d'absorption α' et rayonne comme un corps noir à la température T_{en} alors on peut écrire le bilan thermique comme suit:

$$(3.1) \quad \alpha G^* + \alpha' \sigma T_{en}^4 = \varepsilon \sigma T^4 + P_c$$

Où $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, c'est la constante de Stefan–Boltzmann [28]

P_c sont les pertes par convection et T_{en} est la température d'environnement.

La température T est dite de stagnation c'est la température correspondant à l'équilibre thermodynamique. C'est la température que l'on peut obtenir par une plaque exposée au soleil. Si on évacue une certaine quantité de chaleur ϕ_u l'équation (3.1) devient:

$$\alpha G^* + \alpha' \sigma T_{en}^4 = \varepsilon \sigma T^4 + P_c + \phi_u \quad (3.2)$$

Alors l'absorbeur va rayonner avec une température plus basse.

La température T_{en} est difficile à déterminer, habituellement la température du ciel est plus basse que la température de l'air.

Généralement on peut déterminer empiriquement T_{en} par la formule de Whiller:

$$T_{en} = T_a - 6^\circ \quad (3.3)$$

On prendra fréquemment $T_{en} \cong T_a$

T_a Est la température ambiante

III-3-2/Le rendement

On définit le rendement thermique de l'absorbeur par la relation suivante:

$$\eta = \frac{\phi_u}{G^*} \quad (3.4)$$

En négligeant les pertes par convection, l'équation (3.2) donne:

$$\phi_u = \alpha G^* + \alpha' \sigma T_a^4 - \varepsilon \sigma T^4$$

Il vient alors:

$$\begin{aligned} \eta_R &= \alpha + \frac{\alpha'}{G^*} \sigma T_a^4 - \frac{\varepsilon}{G^*} \sigma T^4 \\ &= \alpha \left[1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{(T^4 - T_a^4)}{G^*} \right] + \frac{\sigma T_a^4}{G^*} (\alpha' - \varepsilon) \end{aligned}$$

Ou on peut négliger le dernier terme du deuxième membre et en remplaçant T_{en} par T_a .
 Puisque $\varepsilon(T^4 - T_a^4) \gg T_a^4(\alpha' - \varepsilon)$

$$\text{Alors } \left(\frac{\alpha' - \varepsilon}{\varepsilon}\right) \ll \frac{T^4 - T_a^4}{T_a^4}$$

D'où

$$\eta = \alpha \left[1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{G^*} \right] \quad (3.5)$$

De l'équation (3.5), il est bien visible que le rendement radiatif pourra prendre une valeur maximale en diminuant le terme $\frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \left(\frac{T^4 - T_a^4}{G^*}\right)$, et cela est possible par l'augmentation du rapport

$\frac{\varepsilon}{\alpha}$ on dit qu'on a affaire à la sélectivité.

Ou par l'augmentation de l'énergie incidente en plaçant un réflecteur dont la surface S très grande par rapport à celle de l'absorbeur.

On dit qu'on s'intéresse alors à la concentration.

Soit alors G^* l'énergie incidente et tombant sur S, elle va être collecté sur la surface s^* de l'absorbeur.

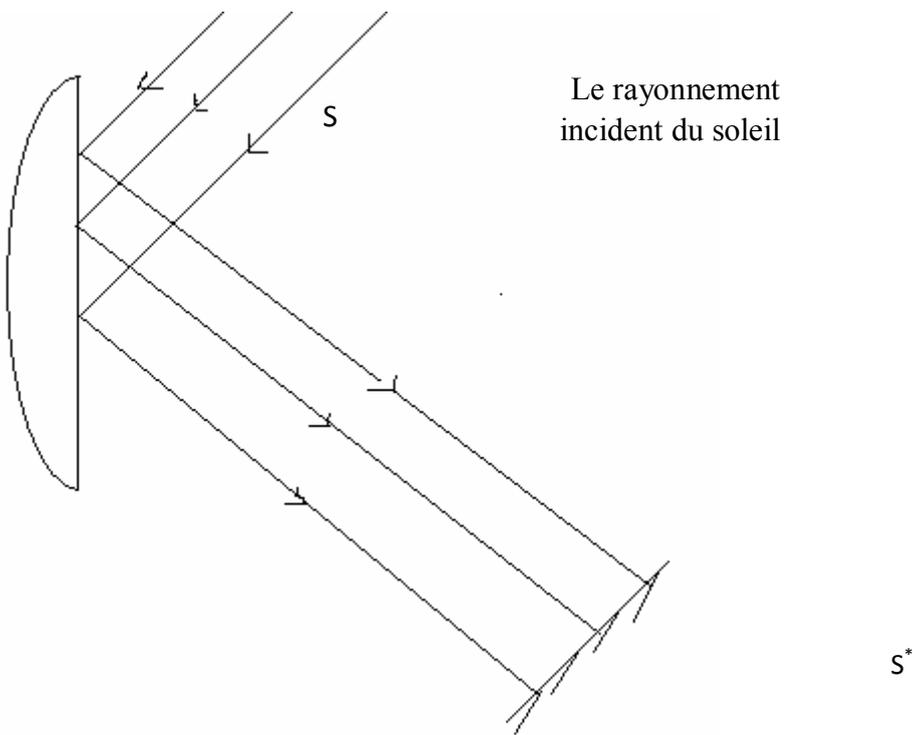


Fig.3.4 Principe de concentration du rayonnement sur une surface

La puissance se trouve donc multipliée par le rapport C des surfaces, qui est le facteur de **concentration**.

$$C = \frac{S}{S^*}$$

Alors le rendement devient

$$\eta = \alpha \left[1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \left(\frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} \right) \right] \quad (3.6)$$

L'énergie captée est maintenant: CG^* [15]

Pour un corps noir: $\varepsilon = \alpha \cong 1$

Donc

$$\eta_r = \alpha \left[1 - \sigma \left(\frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} \right) \right] = \alpha (1 - f(T))$$

III-3-3/la sélectivité d'une surface

La surface dont les propriétés optiques (facteurs de réflexion, d'absorption, de transmission ainsi que l'émissivité) dépendent de la longueur d'onde considérée est dite surface sélective. La surface sélective utilisée pour l'absorbeur d'un capteur solaire est généralement peu émissive aux températures d'utilisation et ainsi les déperditions thermiques par émission sont réduites.

III-3-4/Augmentation de l'énergie captée par utilisation de surfaces sélectives

La surface captatrice idéale du rayonnement solaire devrait absorber toute l'énergie correspondant au spectre solaire, c'est-à-dire pour $\lambda < 3\mu m$, et émettre faiblement dans l'infrarouge lointain ($\lambda > 3\mu m$) correspondant au spectre du rayonnement réémis par l'absorbeur dont la température se situe entre 50 et 100°C pour les capteurs plans par exemple.

Il est évident que la recherche de telles surfaces présentes surtout l'intérêt pour les surfaces captatrices à haute température (en utilisant les concentrateurs) car la loi de réémission de l'énergie est proportionnelle à T^4 .

Dans des conditions normales de fonctionnement, la surface idéale devra donc posséder des valeurs suivantes portées sur la fig.3.5 pour ses facteurs monochromatiques d'absorption α_λ , d'émission ε_λ de réflexion ρ_λ et de transmission τ_λ ; λ_c est la longueur d'onde.

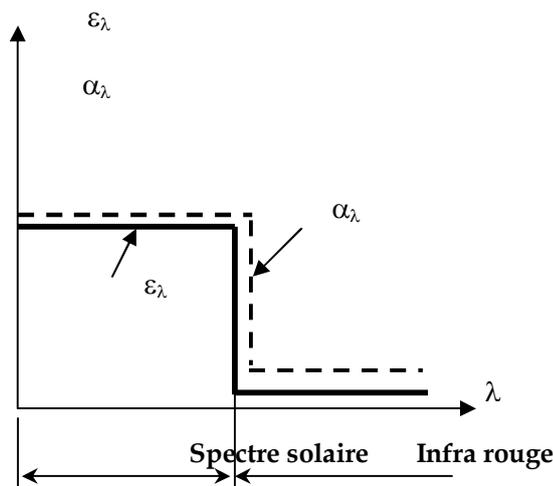


Fig.3.5 Absorption et l'émission monochromatique [29] $\lambda_c = 3\mu m$

III-3-5/Modélisation de la surface d'absorbeur

Modéliser une surface c'est modéliser ses propriétés optiques $\alpha, \varepsilon, \lambda$.

Soit un modèle de surface avec des propriétés optiques A, E, λ_c .

Le corps de la surface est supposé comme un corps noir émettant dans l'infrarouge.

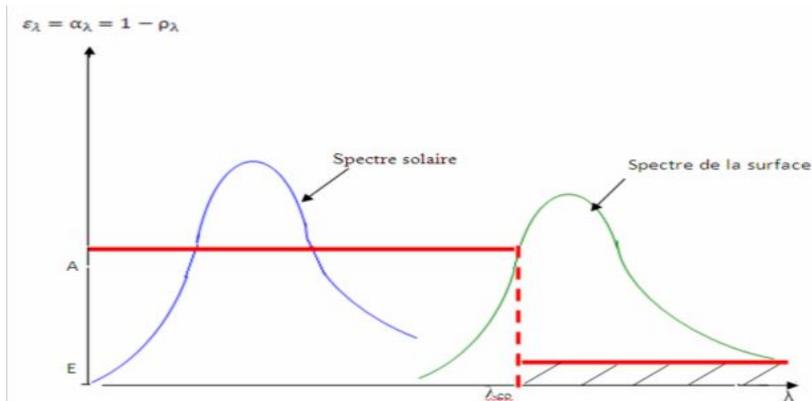


Fig.3.6 La modélisation des propriétés optiques de l'absorbeur

La surface doit bien absorber la puissance du spectre solaire, $\alpha_\lambda=1-\rho_\lambda$, qui doit être très grand pour le spectre solaire ($\lambda \cong 2.3-3\mu m$) et émettre très peu dans l'infrarouge, soit $\varepsilon_\lambda=1-\rho_\lambda$ qui doit être très peu.

Pour le spectre de la surface, le problème qui se pose c'est ou il faut positionner la longueur de coupure λ_c .

Dans ce cas λ_c elle doit être choisie de manière à ce que l'on observe le spectre du soleil.

C'est une fonction de la température de l'absorbeur aussi.

Le soleil sera assimilé à un corps noir à la température T_s donc elle envoie sur la terre σT_s^4

Appelons $M_\lambda(T_s)$ l'émittance monochromatique du soleil.

$$\alpha = \frac{1}{\sigma T_s^4} \left[A \int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda + E \int_{\lambda_c}^{\infty} M_\lambda(T_s) d\lambda \right]$$

$$= \frac{1}{\sigma T_s^4} \left[A \int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda + E \sigma T_s^4 - E \int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda \right]$$

Soit

$$\alpha = (A - E) \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda}{\sigma T_s^4} + E \quad (3.7)$$

On pose: $k_s = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda}{\sigma T_s^4}$ qui mesure la proportion d'énergie absorbée sur la gamme

λ_c) qui est donnée par les tables.

D'où

$$\alpha = (A - E)k_s + E \quad (3.8)$$

Pour le spectre de la surface de l'absorbeur à la température T on a:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sigma T^4} [A \int_0^{\lambda_c} M(\lambda, T) d\lambda + E \int_{\lambda_c}^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda]$$

On aura similairement:

$$\varepsilon = (A - E)k + E \quad (3.9)$$

$$\text{Avec } k = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}$$

Donc ε ne dépend que de la température de la surface par l'intermédiaire de K.

Formant le rapport
$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{(A/E - 1)k_s + 1}{(A/E - 1)k + 1}$$

Le rapport α/ε dépend de la température T, de λ_c et du rapport A/E.

Tel que $s=A/E$ appelé facteur de sélectivité.

Il ne dépend pas de la température mais de la surface uniquement c'est pourquoi on l'appelle le vrai facteur de sélectivité il ne dépend de la technique de modélisation.

Le rendement radiatif s'écrit aussi comme suit:

$$\eta_R = \alpha - \frac{\varepsilon\sigma[T^4 - T_a^4]}{CG^*}$$

$$= (A - E)k_s + E - [(A - E)k + E]\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}$$

Soient en divisant par A:

$$\frac{\eta_R}{A} = (1 - \frac{1}{s})k_s + \frac{1}{s} - [(1 - \frac{1}{s})k + \frac{1}{s}]\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} \quad (3.10)$$

Donc

$$\frac{\eta_R}{A} = f(s, T, \lambda_c)$$

Qui peut s'écrire aussi:

$$\frac{\eta_R}{A} = k_s - k\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} - \frac{1}{s} [(k_s - 1) + (1 - k)\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}]$$

Ou

$$\frac{\eta_R}{A} = K_1 - \frac{K_2}{s}$$

$$\text{Où: } K_1 = k_s - k\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}$$

$$\text{Et } K_2 = [(k_s - 1) + (1 - k)\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}]$$

Si la sélectivité est idéale $s \longrightarrow \infty$ alors :

$$\frac{\eta_R}{A} = K_1 = k_s - k\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}$$

On voit que:

$$\frac{\eta_R}{A} = f(T)$$

Pour qu'il ne soit pas ainsi, il faut que K soit nul donc:

$$\frac{\eta_R}{A} = k_s$$

Où $\eta_R = Ak_s$

Ceci montre que le rendement maximal rapporté au facteur d'absorption modélisé A, devient :

$$\left(\frac{\eta_R}{A}\right)_{\max} = K_1$$

On prend alors le rendement effectif η_R sous la forme :

$$\eta_R = \gamma \eta_{R \max}$$

Avec $0 \leq \gamma < 1$

γ est appelé coefficient de performance du capteur.

Donc

$$\frac{\eta_R}{A} = K_1 - \frac{K_2}{s} = \gamma K_1$$

Ce qui implique que :

$$K_1 s (1 - \gamma) = K_2$$

Donc

$$(1 - \gamma)s = \frac{K_2}{K_1}$$

Soit, en remplaçant les k_1 et k_2 par leur valeur

$$(1 - \gamma)s(\eta_R / A)_{\max} + 1 - (\eta_R / A)_{\max} = \sigma \left(\frac{T^4 - T_{en}^4}{CG^*} \right) \quad (3.11)$$

Dans le où les pertes par convections et conduction sont prises en compte sous une forme linéaire :

$$P_c = h(T - T_{en})$$

On a alors :

$$\eta / A = K_1 - K_2 / s - \frac{h(T - T_{en})}{A.CG^*}$$

D'où on déduit la relation

$$(1-\gamma)s(\eta_R / A)_{\max} + 1 - (\eta_R / A)_{\max} = \sigma \left(\frac{T^4 - T_{en}^4}{CG^*} \right) + \frac{h(T - T_{en})}{ACG^*}$$

On pose

$$y = (1-\gamma)s(\eta_R / A)_{\max} + 1 - (\eta_R / A)_{\max} \quad (3.12)$$

On obtient

$$\log_{10} y = -\log_{10} CG^* + \log_{10} \left(\sigma(T^4 - T_a^4) + \frac{h}{A}(T - T_a) \right) \quad (3.13)$$

III-3-6/Caractéristiques de la surface sélective

A/ Optimisation de la longueur d'onde de coupure

Il est bien claire que $k_s = f(\lambda_c)$ et $k = f(T, \lambda_c)$.

On cherche λ_c qui nous donne le rendement radiatif maximal.

La valeur de la longueur d'onde optimisée, c'est-à-dire celle qui vérifie la relation :

$$\left(\frac{\partial \eta_R / A}{\partial \lambda} \right)_{\lambda_{co}} = 0$$

$$\frac{\partial \left(\frac{\eta_R}{A} \right)}{\partial \lambda_c} = \left(1 - \frac{1}{s} \right) \frac{\partial k_s}{\partial \lambda_c} - \left(1 - \frac{1}{s} \right) \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} \frac{\partial k}{\partial \lambda_c} = 0$$

Alors

$$\frac{\partial k_s}{\partial \lambda_c} = \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} \frac{\partial k}{\partial \lambda_c}$$

$$\text{On a } k_s = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda}{\sigma T_s^4} = \frac{1}{\sigma T_s^4} \int_0^{\lambda_c} \frac{c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

$$\frac{\partial k_s}{\partial \lambda_c} = \frac{1}{\sigma T_s^4} \left(\frac{c_1 U_s^{-5}}{e^{c_2/U_s} - 1} \right)$$

Avec $U_s = \lambda_c T_s$

Et de même

$$\frac{\partial k}{\partial \lambda_c} = \frac{c_1}{\sigma T^4} \left(\frac{U^{-5}}{e^{c_2/\lambda_c T} - 1} \right)$$

Formant le rapport

$$\frac{\frac{\partial k_s}{\partial \lambda_c}}{\frac{\partial k}{\partial \lambda_c}} \Big|_{\lambda_c = \lambda_{co}} = \frac{T^4}{T_s^4} \left[\frac{e^{c_2/\lambda_{co} T} - 1}{e^{c_2/\lambda_{co} T_s} - 1} \right] = \frac{\sigma}{CG^*} [T^4 - T_a^4]$$

On voit que: $\lambda_c = f(T, C)$

L'analyse de $\left(\frac{\partial(\frac{\eta_R}{A})}{\partial \lambda_c} \right)$ donne que $e^{c_2/\lambda_{co}} \rightarrow 0$, Ce qui implique que l'expression passe par le maximum correspond à λ_{cop} .

La longueur d'onde de coupure pour une surface sélective doit être proche de la longueur limite du spectre solaire pour qu'elle puisse absorber le maximum possible de l'énergie solaire ($\lambda \approx 2.5 \mu m$).

***Pour les faibles températures**

Le rendement s'exprime par:

$$\frac{\eta_R}{A} = \left(1 - \frac{1}{s}\right) K_s + \frac{1}{s}$$

(Avec la négligence du terme $\left[\left(1 - \frac{1}{s}\right) k + \frac{1}{s} \right] \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}$).

Si on augmente la sélectivité de la surface, $\frac{1}{s}$ tend vers zéro et $\frac{\eta_R}{A}$ tant vers k_s .

De même, si $s \rightarrow 1$ on a $\frac{\eta_R}{A} = 1$

***Pour les hautes températures**

Le terme $\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*}$ augmente rapidement et on est aussi dans le cas où $s \rightarrow \infty$ car le rendement va diminuer de la quantité qu'on n'a pas négligée maintenant.

Alors pour les fortes et les très basses températures, la sélectivité est inutile.

Elle est utile pour la gamme de températures [40°-500°] généralement pour $T < 40^\circ$ on emploie ni la sélectivité ni la concentration.

Pour les températures supérieures à 500°C on n'emploie que la concentration.

B/ La valeur limite de la température

Supposons qu'on a fait la manipulation hors d'atmosphère

Alors $p_c = 0$ et $E=0$ donc on a:

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{(A-E)k_s + E}{(A-E)k + E} = \frac{k_s}{k}$$

Et en prenons $\eta_R = 0$ (on soude, pas de flux $\phi_u = 0$)

$$\eta = \alpha \left(1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} \right) = 0 \Rightarrow \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{CG^*} = \frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{k_s}{k} = \frac{T_l^4 \int_0^{\lambda_c} M(\lambda_c, T_s) d\lambda}{T_s^4 \int_0^{\lambda_c} M(\lambda_c, T) d\lambda}$$

Où T_l est la température limite

$$\text{Avec } k_s = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(\lambda_c, T_s) d\lambda}{\sigma T_s^4} \text{ et } k = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(\lambda_c, T) d\lambda}{\sigma T^4}$$

Pour augmenter la température on doit diminuer la longueur d'onde de coupure alors en diminuant au maximum la longueur d'onde λ_c on arrive à la formule suivante:

$$\frac{\sigma_s T^4}{CG^*} = e^{c_2/\lambda_c} \cdot \frac{T_s - T_l}{T_s \cdot T_l}$$

Après avoir négligé la température ambiante T_a ou T_{en} .

Et alors on obtient finalement l'expression de la variation de cette température limite en fonction de la longueur d'onde de coupure voir la figure 5.5:

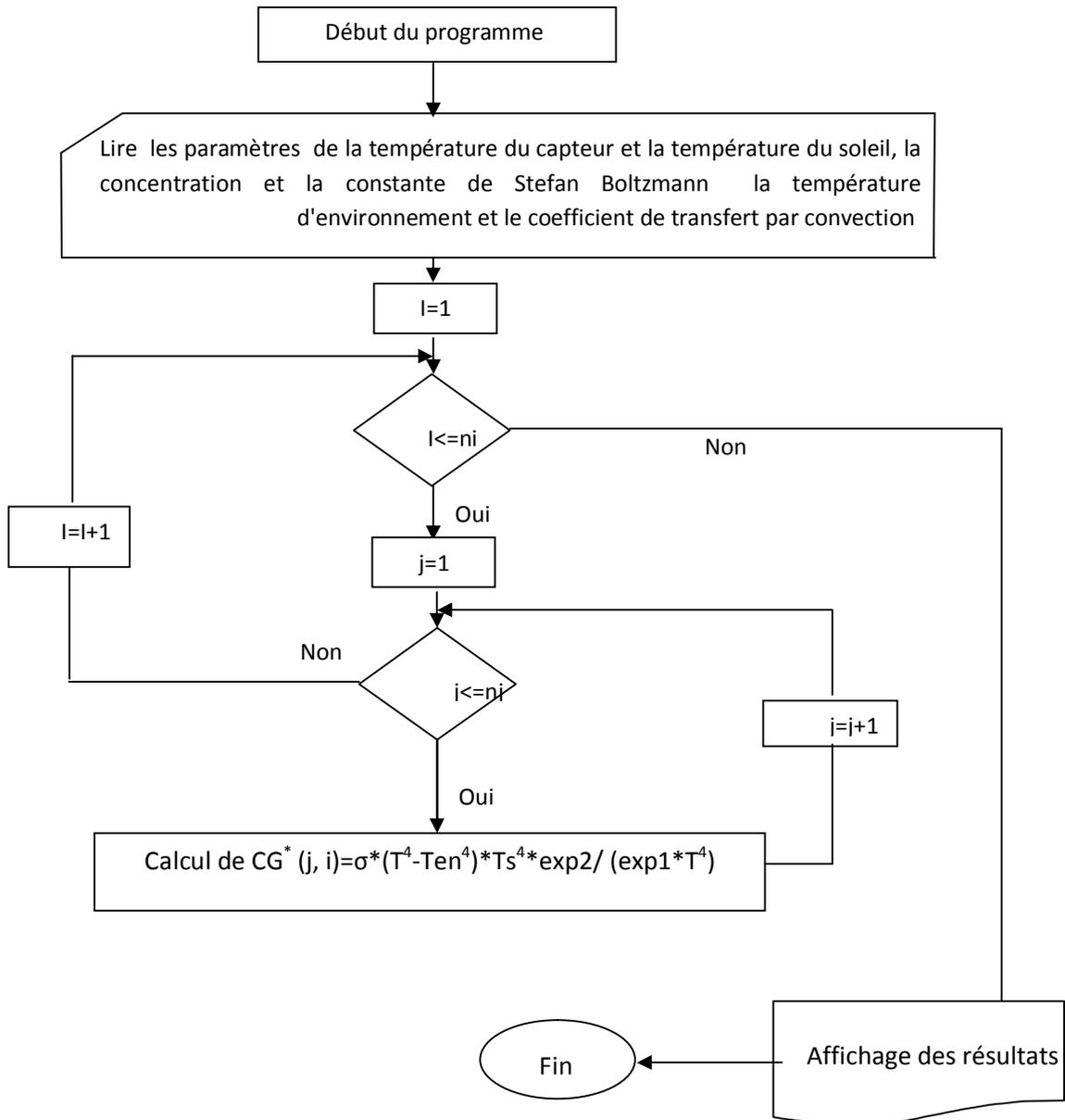
$$T_l = \frac{T_s c_2 \lambda_c}{T_s \ln \frac{\sigma T_s^4}{CG} + c_2 \lambda_c} = f(\lambda_c)$$

Chapitre 04

Simulation des paramètres de l'absorbeur

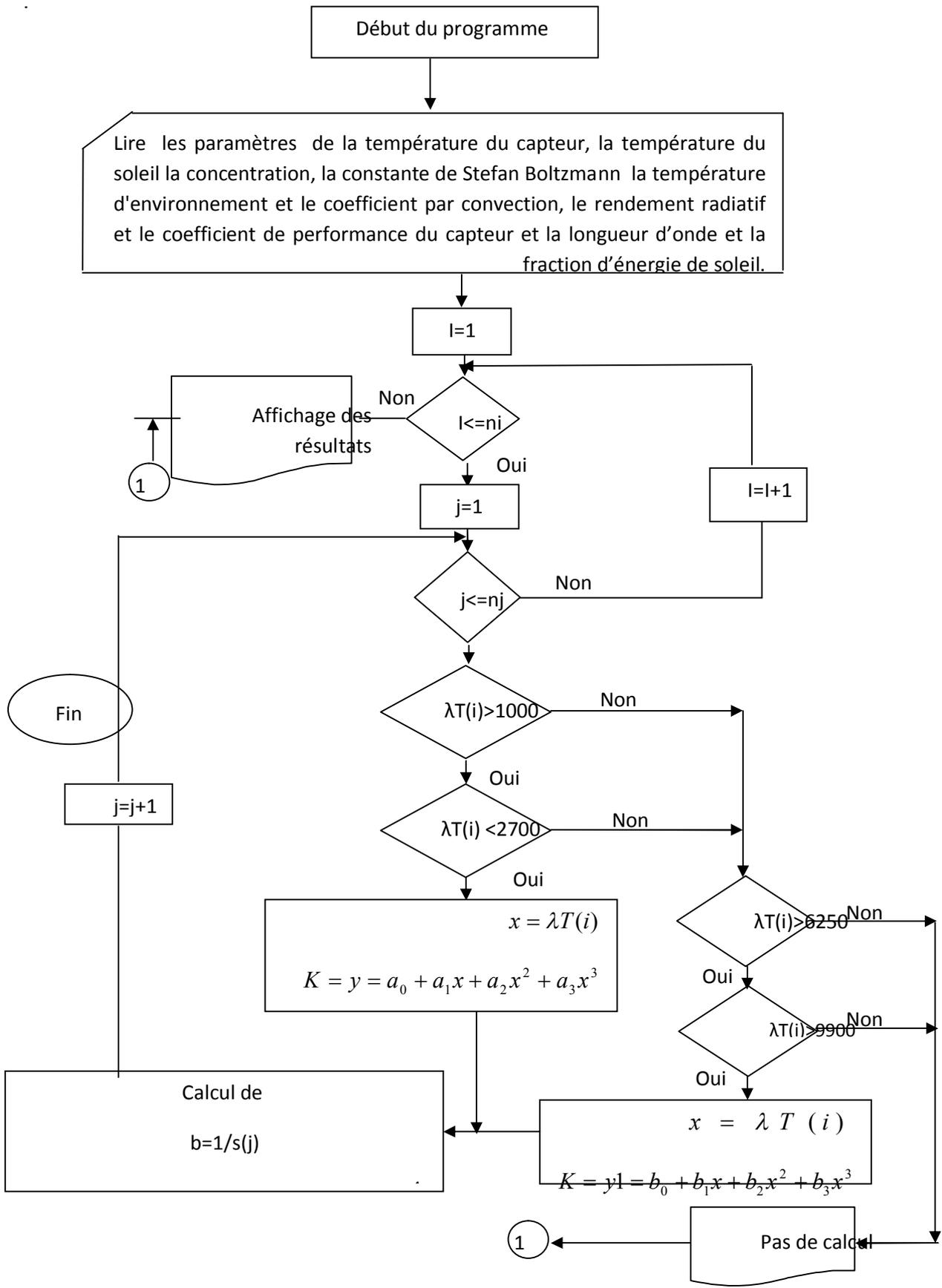
Simulation des propriétés de l'absorbeur

L'étude précédente nous permet d'effectuer la simulation des différentes caractéristiques de l'absorbeur au moyen d'un programme de calcul élaboré en langage Fortran version 6.6, dont on représente les différentes étapes de calcul par des organigrammes ci-dessous.

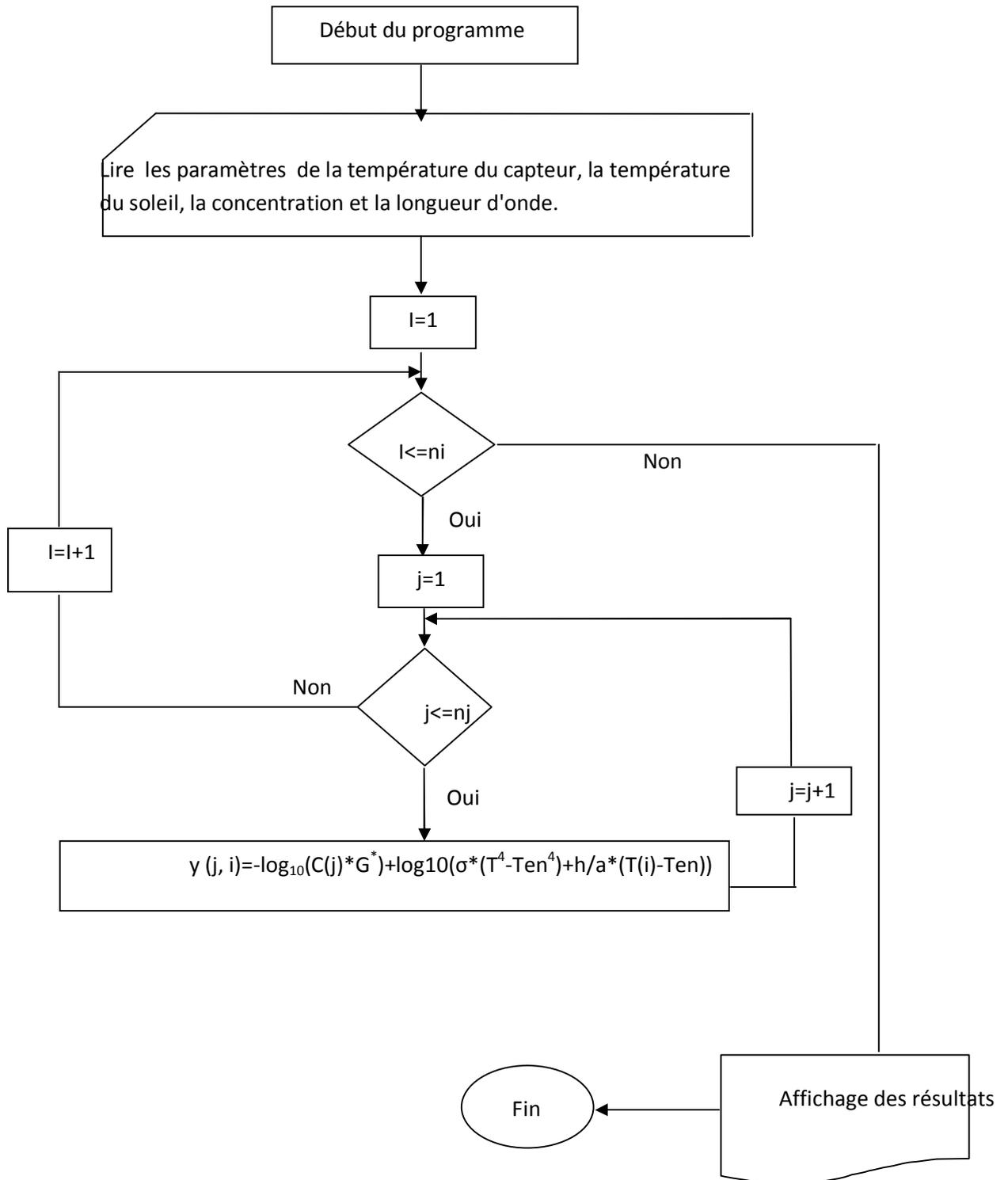


La 2^{ème} caractéristique est le rendement et l'influence des quatre paramètres tels que la température d'absorbeur, la longueur d'onde optimale, la sélectivité et la concentration.

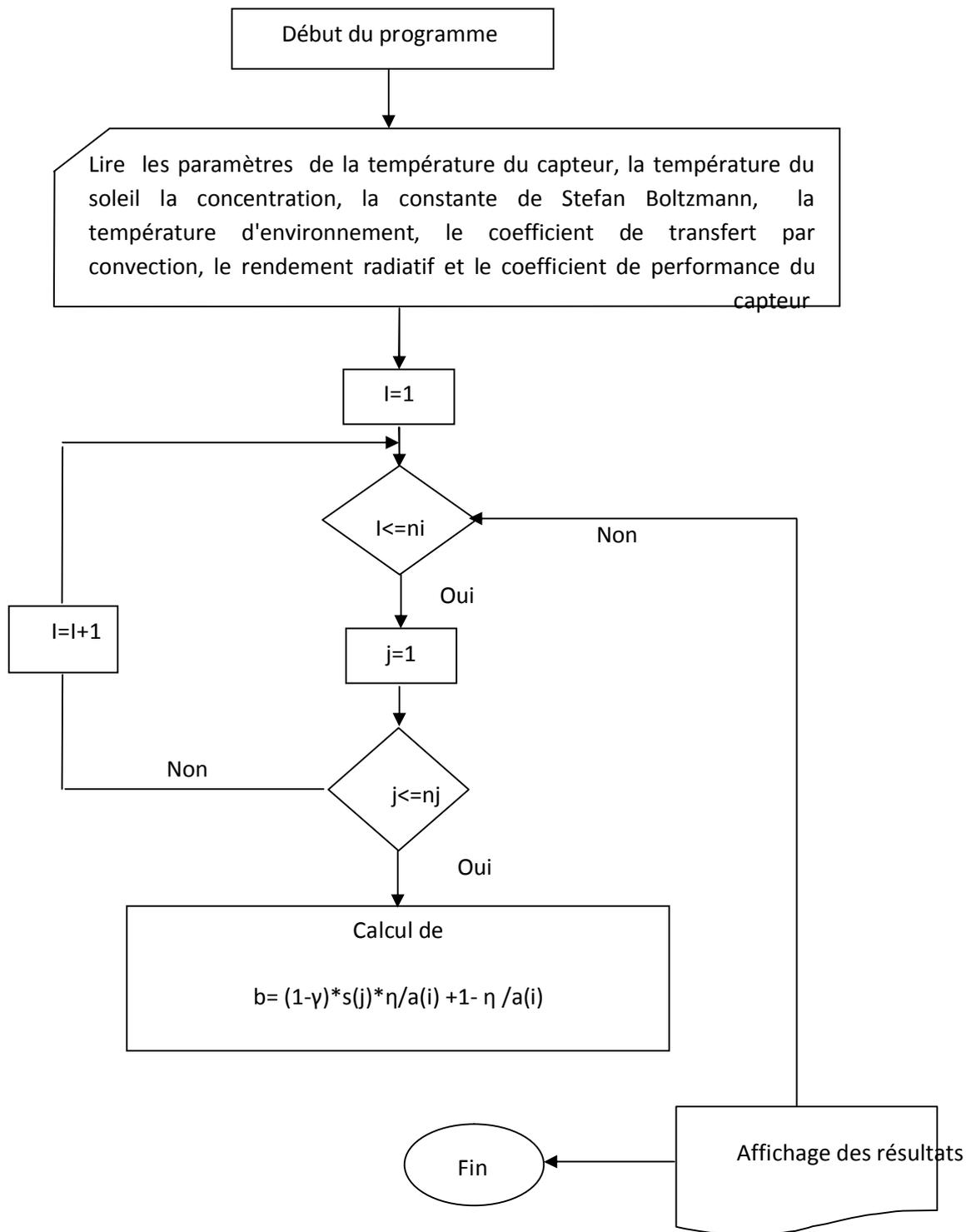
Voila leur organigramme



La 3^{ème} caractéristique c'est la fonction de $\log(y)$ tel que y est donné par l'expression suivante $y = s(1 - \gamma)(\eta_R / A)_{\max} + 1 - (\eta_R / A)_{\max}$



La 4^{ème} caractéristique est la sélectivité qui est donné par son expression en fonction de la concentration est à chaque fois on fait varier la température et le coefficient de transfert par convection.



Chapitre 05

Résultats & Discussions

Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous avons utilisé un programme pour la simulation des différents paramètres évoqués précédemment.

La variation de la fonction $\log_{10} y$ (3.13) en fonction de la concentration est représentée sur la figure 4.1, elle dépend linéairement du $\text{Log}_{10} (CG^*)$, les courbes représentatives sont tracés sur la figure 5.1; elles sont obtenues pour $h/A=1, 5, 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ et pour des différentes températures.

On remarque bien sur cette figure, la sélectivité diminue avec l'accroissement du rapport entre le coefficient de transfert de chaleur par convection et le coefficient d'absorption de la surface.

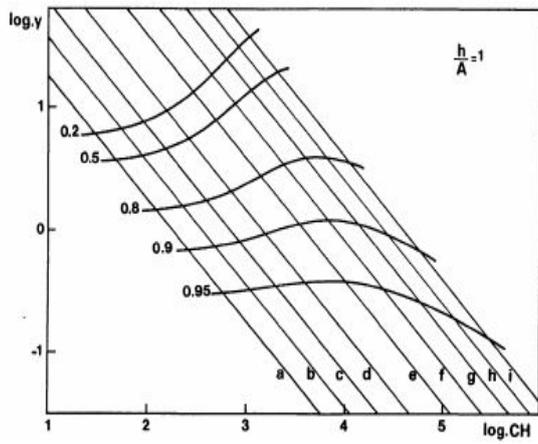
D'autre part on note que l'accroissement du facteur de la concentration du rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur fait diminuer son facteur de sélectivité.

En revanche, pour une concentration C , et le rapport h/A donnés, on remarque qu'elle est une fonction croissante de la température de la surface absorbante.

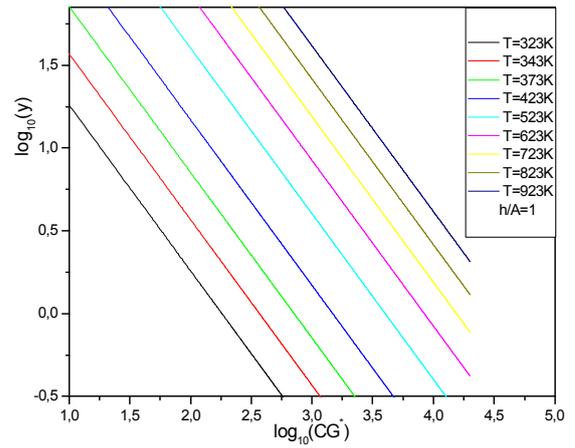
La figure.5.1 montre bien que la sélectivité est fortement influencée par les propriétés thermiques et optiques représentatives par le rapport (h/A) .

Donc la température et le rapport h/A influe sur l'expression de $\text{Log}_{10}(y)$.

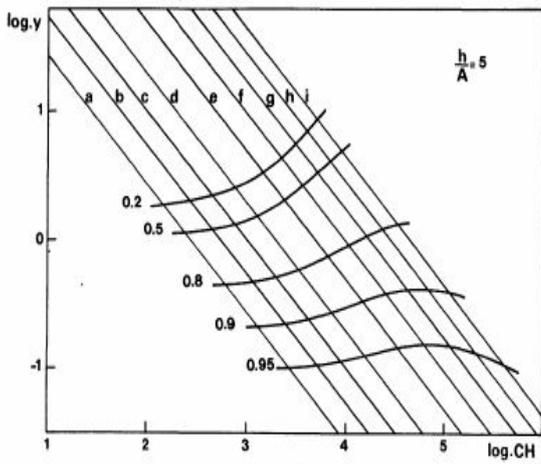
De la comparaison des figures 5.1.A, B, C, D, E, F, on trouve que nos résultats sont en bon accord avec celle de la référence [7]



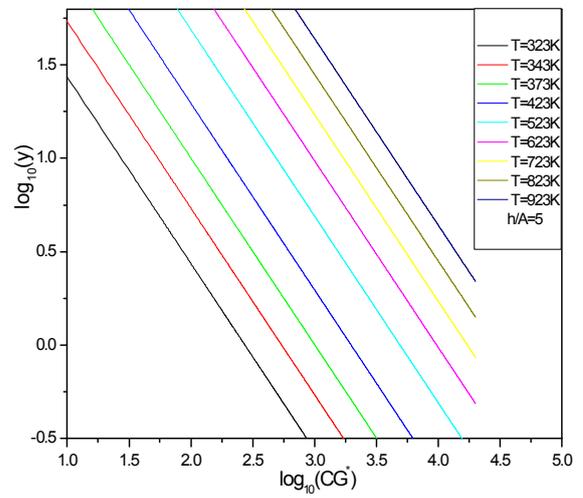
A. [7]



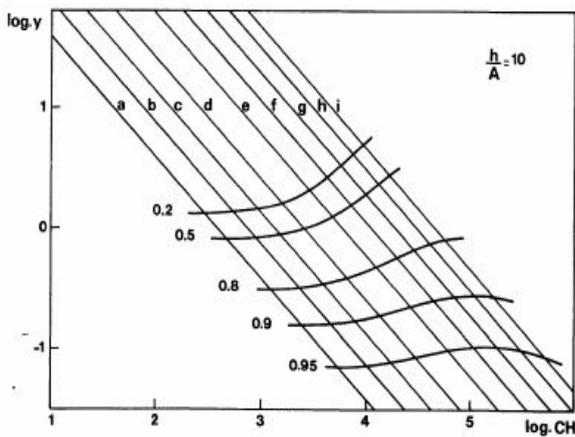
B.



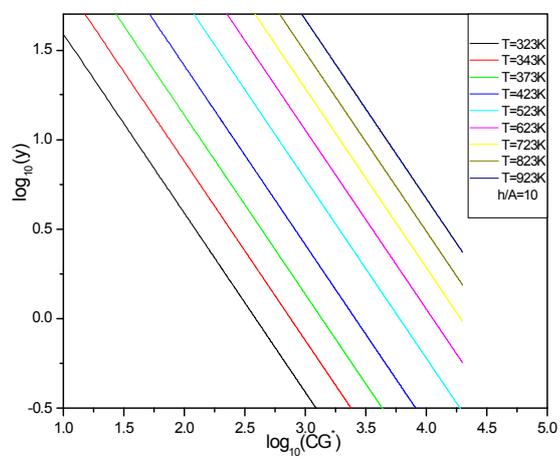
C. [7]



D.



E. [7]



F. Fig. 5.1: A, B, C, E, F, courbes de la fonction $\text{Log}_{10}(y) = f(\text{Log}_{10}(CG^*))$

a, b, c, d, e, f, g, h, i, représente les mêmes températures.

La figure 5.2 représente la variation de la sélectivité de la surface de l'absorbeur en fonction de la concentration pour différentes valeurs du rendement radiatif effectif, de la température et du rapport défini précédemment.

Ces graphes mettent bien en évidence l'impact du facteur de concentration du rayonnement sur le facteur de la sélectivité de la surface de l'absorbeur.

Un point remarquable ($s=1,89$, $CG=1040,9$) qui est le même pour les différents profils de la figure 5.2.a, ce qui montre que les différents rendements non pas d'influence sur la sélectivité pour une concentration voisine de 1041 W/m^2 .

Pour s qui tend vers l'infini n'as pas d'influence, le rendement s'atténue de sorte que son effet sur la sélectivité de la surface est beaucoup plus significatif s'étalant sur la gamme de l'énergie concentrée de $(200-1041) \text{ W/m}^2$.

Pour s tend vers l'infini tout les profils convergent vers un seul profil .pour les hautes concentrations la sélectivité n'a qu'un effet peu significatif.

L'influence du rapport du coefficient de transfert de chaleur par convection au facteur d'absorption du rayonnement reste beaucoup évidente sur la gamme des concentrations s'étalant $(0- 1400) \text{ w/m}^2$.

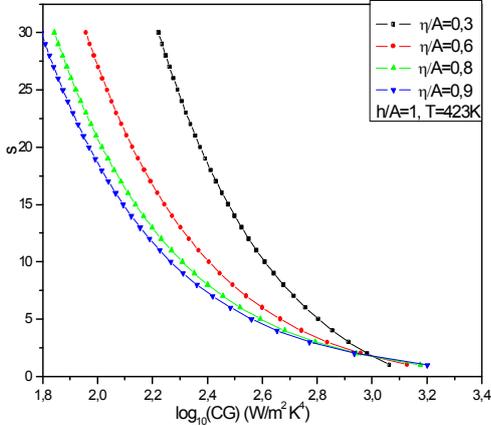
Pour un capteur plan on observe que la température de fonctionnement ne peut pas atteindre 500K si les pertes par convection ne sont pas notablement réduites ; même si les pertes P_c sont faibles, la valeur de s doit être de l'ordre de 10:

C'est pratiquement la limite de conversion thermique à l'aide d'un capteur plan sans concentration du rayonnement solaire.

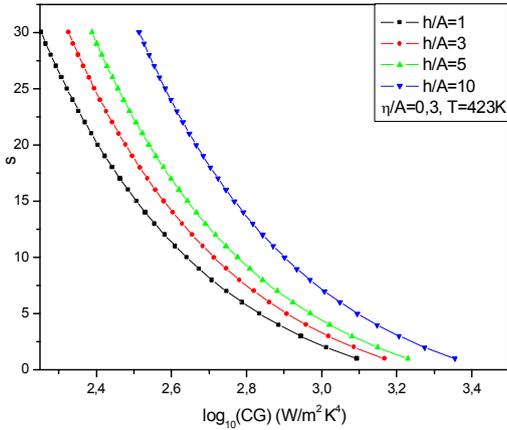
D'autre part, $T=900^\circ\text{C}$, les concentrations comprises entre 1 et 25 conduisent à choisir le facteur de sélectivité élevé avec une influence d'une convection forcée. Pour éliminer cet inconvénient, on doit se placer dans un domaine de puissance incidente correspondant à une concentration supérieure à 25, le facteur de sélectivité diminue alors et devient même égal à 1(cas d'une surface noire ou grise).

Correspondant à l'emploi de la sélectivité seule, à l'emploi simultané de la sélectivité et la concentration ou à la concentration seule respectivement.

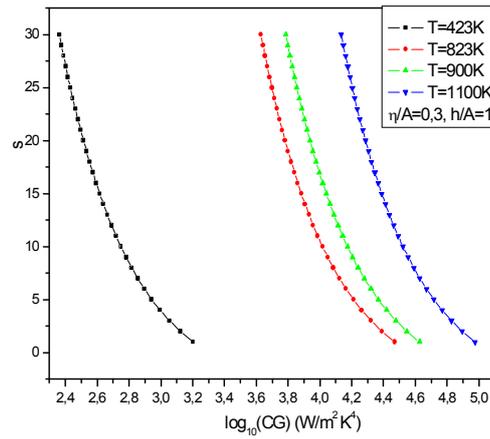
L'accroissement du facteur de concentration C peut être préférable à l'emploi d'une surface sélective.



a.



b.



c.

Fig.5.2 : a, b, c : la variation du facteur de la sélectivité s en fonction $\text{Log}_{10} (CG)$

Le graphe de la figure.5.3 montre la longueur d'onde de coupure λ_{co} en fonction de $\text{Log}_{10} (CG)$ pour des différentes températures.

La longueur d'onde λ_{cop} augmente lorsque la concentration augmente mais elle diminue lorsque la température augmente.

Pour les faibles concentrations, $\log_{10} (CG^*) < 0.2$ la température n'a aucune influence sur le paramètre de la longueur d'onde.

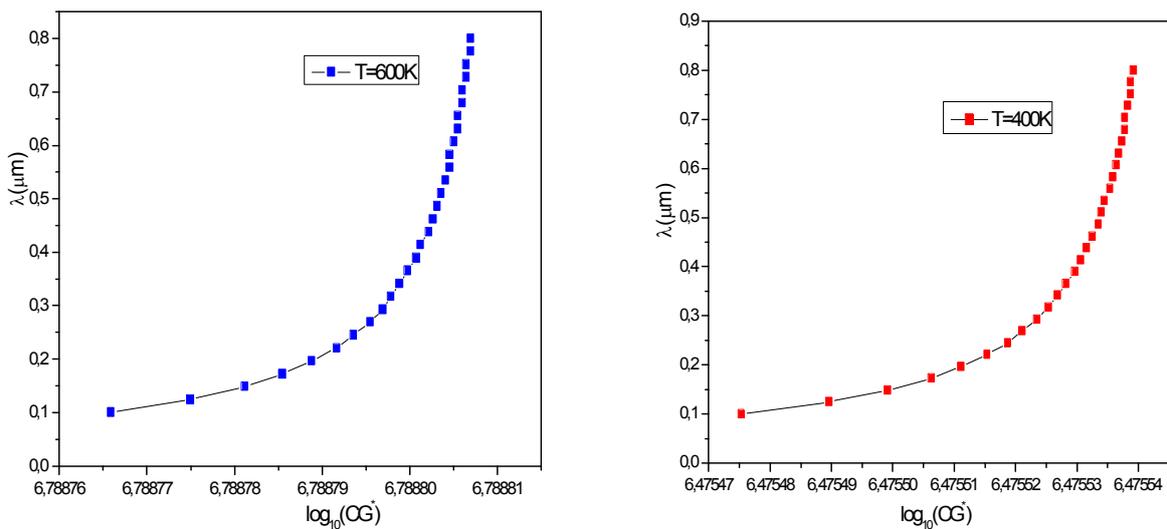


Fig.5.3: la variation de la fonction $\lambda=f(\text{Log}_{10} (CG^*))$

Les profils suivants représentent les effets des différentes valeurs de la longueur d'onde, de la température et de la concentration.

L'effet de la température sur le rendement est très visible sur la figure 5.4. a, il se concorde qualitativement à beaucoup de résultats de la littérature [7].

L'évidence de l'influence de la longueur d'onde de coupure est bien marquée pour les températures élevées.

En effet, on remarque que l'écart des courbes des rendements commence à se dessiner pour les températures supérieures à 700 K et s'amplifie plus que les températures augmentent au fur et à mesure que les longueurs d'onde de coupure augmentent, alors que pour les températures inférieures à 700K, la longueur d'onde de coupure n'a aucune influence sur le rendement radiatif.

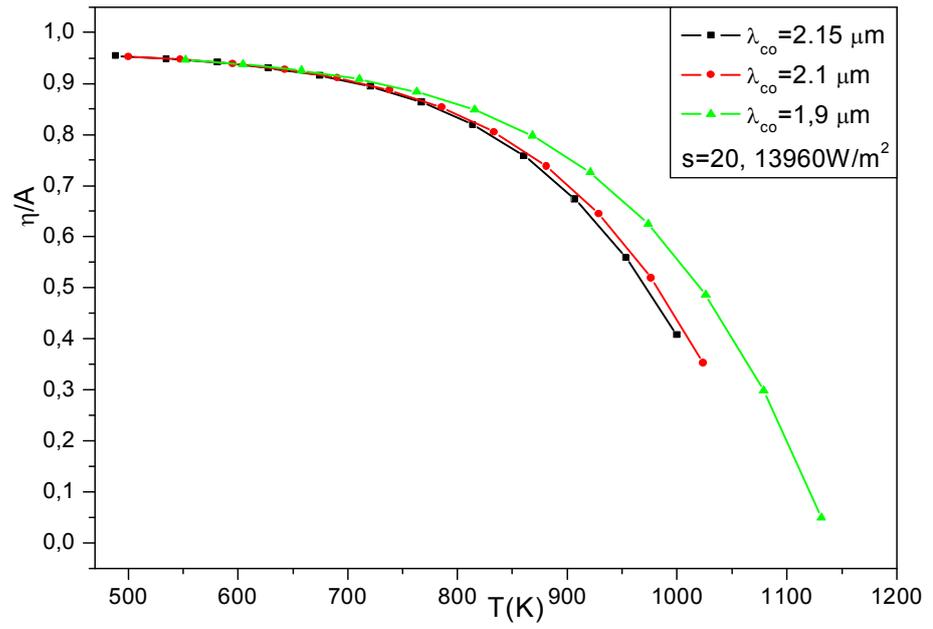
On confirme bien les résultats de la littérature que la sélectivité affecte faiblement les rendements du capteur plan, lorsque sa valeur dépassera environ 15 à 18 comme le montre la figure 5.4.b.

Il faut noter aussi que la sélectivité convient mieux pour les températures moyennes. Pour de fortes températures on assistera au phénomène de l'inversion de la courbe pour ses valeurs faibles qui s'interprétera par la fusion du métal de l'absorbeur.

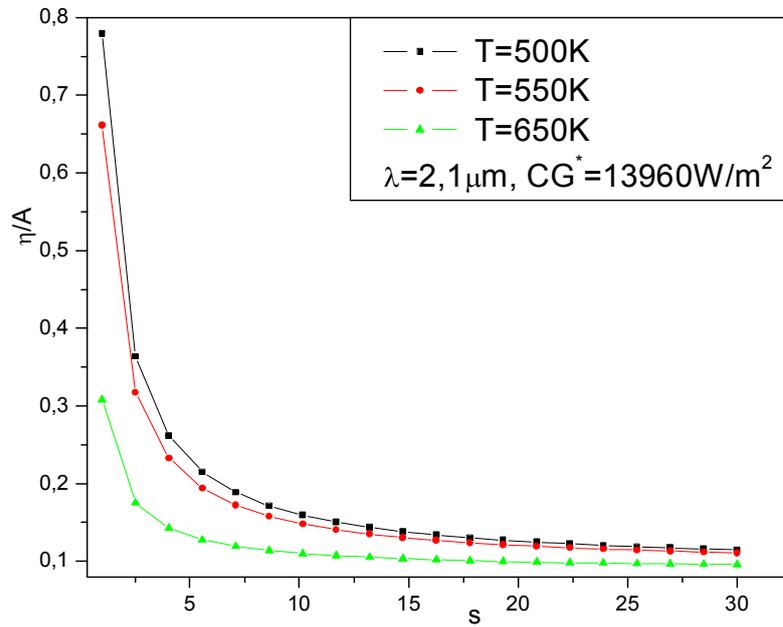
La figure 5.4.b montre aussi que l'augmentation de la sélectivité à partir d'une valeur définie ici $s \approx 20$ n'apporte qu'une contribution faible sur le rendement effectif.

La température de la surface de l'absorbeur fait décroître son rendement radiatif. En effet, cette influence est très significative dans les domaines des faibles concentrations.

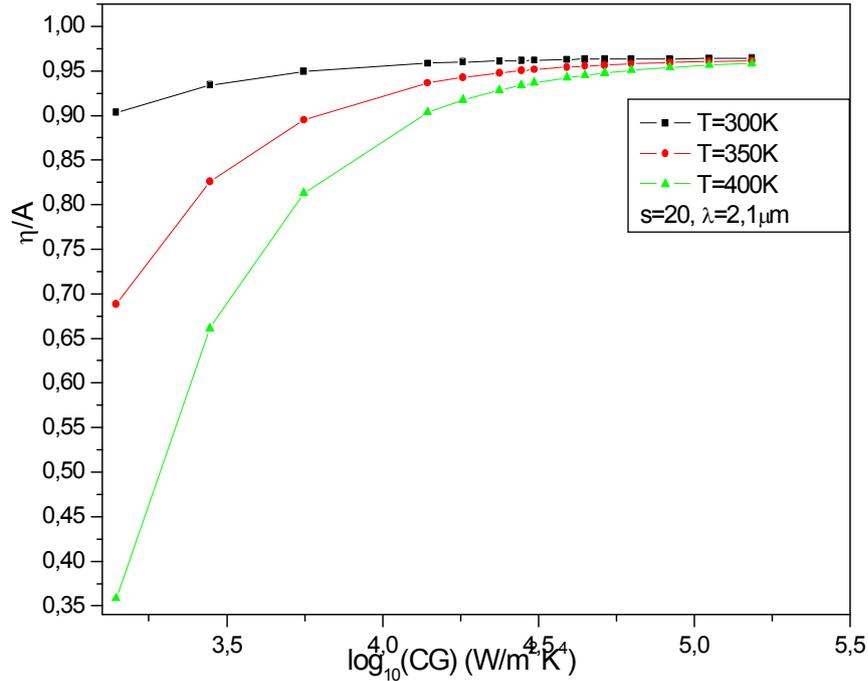
Ce qu'on peut constater aussi que l'influence de la concentration est plus prépondérante que la température surtout pour les hautes concentrations.



.a



.b



.c

Fig.5.4 : la variation du rendement radiatif en fonction de T, λ , CG et s

Dans le reste d'intervalle de 700K à l'infini le rendement diminue avec l'augmentation de la température.

Concernant la variation de la température de 400K à 600 le rendement prend une valeur maximale pour les trois températures puis il décroît avec l'augmentation de la longueur d'onde de coupure optimale et enfin il reste constant sur l'intervalle de 20 à l'infini.

Pour le 3ème cas correspond à la figure 5.4.c, le rendement augmente rapidement pour des faibles concentrations.

On remarque sur la figure 5.4.c que pour le point (153560W/m², 0.96), le rendement prend une valeur maximale qui reste constante pour les valeurs supérieures de la concentration.

Dans l'intervalle de sélectivité [0.5] sur la figure 5.4.b, pour T=500K le rendement prend une valeur maximale puis il décroît avec la sélectivité et pour T=550K le rendement diminue par rapport la température précédente puis il décroît avec les hautes concentrations.

Pour les hautes températures le rendement croît avec l'augmentation de la sélectivité.

Dans l'intervalle de la sélectivité de 5 à l'infini de la figure 5.4.b, le rendement reste constant donc pas d'influence de température.

Donc on obtient un rendement maximal lorsqu'on prend des températures inférieures à 500 K et pour des hautes températures le rendement diminue avec une longueur d'onde de 1.9µm.

Le rendement prend une valeur maximum lorsque la longueur d'onde optimale diminue pour une température de 400K, et décroît en fonction de la longueur d'onde optimale.

Les hautes températures influent sur le rendement radiatif; en effet ce dernier pour une température de 600K décroît rapidement par rapport à T>600K (figure 5.4.a).

Pour T=400K le rendement reste constant et pour des hautes températures il commence à décroît rapidement avec la longueur d'onde.

A hautes températures $\frac{\sigma(T^4 - T_a^4)}{C^*G}$ Croît rapidement.

Donc le rendement croît avec le facteur concentration.

Et si $s \rightarrow \infty$, η/A décroît maintenant avec le terme $[(1 - \frac{1}{s})K + \frac{1}{s}] \frac{\sigma(T^4 - T_a^4)}{CG^*}$

Nous observons que λ_{co} croît avec C mais elle décroît avec l'augmentation de la température.

A basse température, le terme $[(1 - \frac{1}{s})K + \frac{1}{s}] \frac{\sigma(T^4 - T_a^4)}{CG^*}$ devient négligeable.

Pour une température donnée on peut également calculer la valeur de s en fonction de CG*

Pour la température limite la figure 5.5 représente leur graphe.

Dans l'intervalle de longueur d'onde [0.1,5] µm la température limite diminue considérablement avec l'augmentation de la longueur d'onde de coupure, à partir de 1.5 µm cette diminution devient faible.

Lors de l'augmentation de la concentration, la température limite accroît

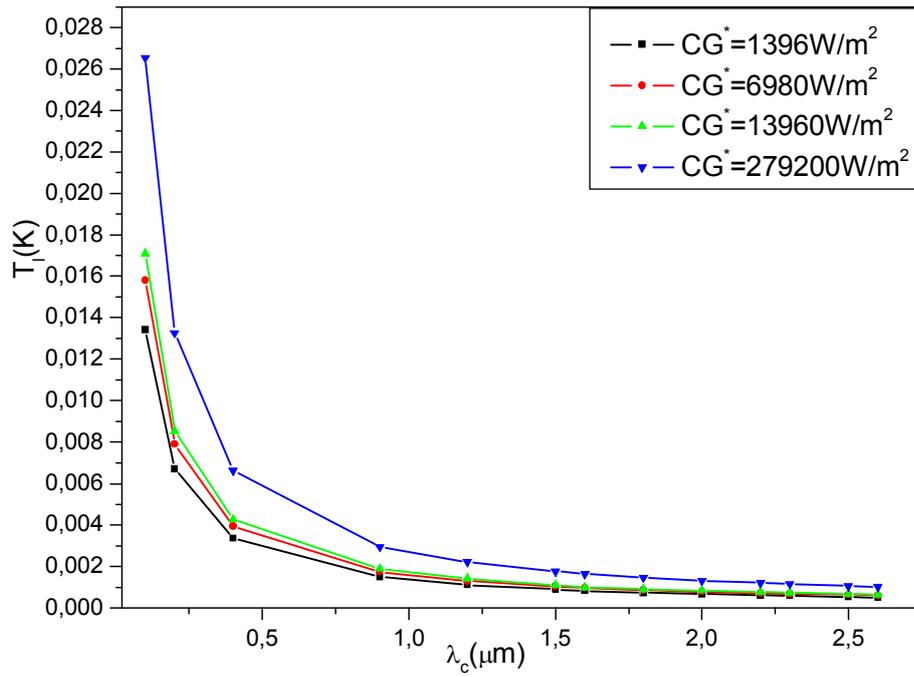


Fig.5.5.1a

variation de la température limite en fonction de la longueur d'onde de coupure.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était la modélisation des propriétés optiques et thermiques d'un absorbeur solaire et d'avoir l'influence de ces paramètres sur le rendement du convertisseur héliothermique.

Pour réaliser cet objectif on a élaboré un programme en langage fortran version 6.6, pour résoudre les problèmes précédents.

Les résultats obtenus se concordent bien avec les résultats rencontrés dans la littérature.

La limite en température des domaines d'emploi de sélectivité et concentration est naturellement assez floue ; on peut situer aux environs de 500°C , c'est-à-dire lorsque le spectre d'émissions du corps chauffé est tel qu'une partie négligeable de la puissance perdue par émission est comprise de la bande spectrale définie par la longueur d'onde de coupure est inférieur à $2-2.5\mu\text{m}$.

Cette analyse montre qu'il est possible de définir des limites aux convertisseurs thermiques à moyenne et à haute température, reposant sur des critères physiques.

Ainsi on peut dire que la moyenne température correspond aux dispositifs non équipés de systèmes de concentration de rayonnement solaire et pour lesquels on fait appel à des surfaces absorbantes sélectives ($70^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$). On atteint la haute température dont la borne, pour les températures atteignant 500°C , on peut utiliser la concentration et la sélectivité simultanément.

Au-delà, la concentration devient le paramètre le plus prépondérant et performant.

Il est également possible avec ce type d'analyse de choisir le point ou la courbe de fonctionnement de l'appareil, son utilisation impose des conditions de la température qui en aucun cas ne dépasse ou même n'atteint la température limite de l'absorbeur

Références bibliographiques



Bibliographie

- [1] **A.Dahmani**, Modélisation thermique d'un capteur solaire plan à eau, thèse d'initiation à la recherche, Batna 2008-2009.
- [2] **F.Antony, C.Dürschner, K.Remmers**, le photovoltaïque pour tous conception et réalisation d'installation, éditions Le Moniteur, 2006.
- [3] http://www.in-terre-actif.com/fr/fichier/energies_renouvelables.pdf
- [4] **Bent Sørensen** Renewable energy its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects, Third Edition, Elsevier Inc, 2004.
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique
- [6] **Pierre Bonho, Yan Eperon et Pierre Renaud**, Unglazed coloured solar absorbers on façade: Modelling and performance evaluation, Sol. Energy, doi:10.1016/j.solener.2008.11.014, 2009.
- [7] **A.Arconada, F.Papini**, Bilans thermiques des convertisseurs de l'énergie solaire : rôle de la sélectivité et la concentration, Revue Phys.Appl.15, pp.163-167, 1980.
- [8] **J.M. Behaghel, S. Berthier et J. Lafait**, propriétés optiques des surfaces sélectifs : Définition et méthode de caractérisation, journal de physique Colloque C1, supplément au n°1, Tome 42, pp. C1-355 janvier 1981.
- [9] **A.M. Schneiders et P. Beucherie**, Sélectivité spectrale par effet de structure des couches minces déposées de Nickel et de chrome, journal de physique Colloque C1, supplément au n°1, Tome 42, pp. C1-123, janvier 1981.
- [10] **Harlan J. Brown-Shaklee, William Carty, et Doreen D. Edwards**, Spectral selectivity of composite enamel coatings on 321 stainless steel, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, doi:10.1016/j.solmat.2009.03.009, 2009.
- [11] **A. Benkhelifa**, Optimisation d'un Capteur Solaire Plan, Rev. Energ. Ren : Physique Energétique, pp. 13-18, 1998.
- [12] **T. Mouhib, A. Mouhsen , E.M. Oualim , M. Harmouchi , J.P. Vigneron et P. Defrance**, Stainless steel/tin/glass coating as spectrally selective material for passive radiative cooling applications, Optical Materials 31, pp.673–677, 2009.
- [13] **B.Drévillon et R.Vanderhaghen**, Comparaison des performances des capteurs héliothermiques plans, Revue Phys.Appl.15, pp.131-138, 1980.
- [14] **Y.JANNOT**, thermique solaire, Octobre 2003.
- [15] **AOUCHRIA .Z**, Cour de 3^{ème} année énergétique sur les capteurs solaires, 2002.

- [16] <http://www.Cours solaire thermique - INES Education.mht>
- [17] http://www.raee.org/docs/FORMATION_SOLAIRE_CNFPT/1ASDER_capteursmarche.pdf
- [18] <http://www.hespul.org/Les-capteurs.html>
- [19] <http://www.planete-energies.com/contenu/energies-renouvelables/energie-solaire/capteurs-solaires-thermiques.html>
- [20] <http://www.Cours solaire thermique - INES Education.mht>
- [21] http://www.apper-solaire.org/coop/AS_Sunrain_gene.JPG
- [22] http://fr.ekopedia.org/Capteur_h%C3%A9lio thermique
- [23] **Hans Dieter Baehr · Karl Stephan**, Heat and Mass Transfer, Second revised Edition, □
March 2006.
- [24] **J.M. Behaghel, S. Berthier et J. Lafait**, propriétés optiques des surfaces sélectives: définitions et méthodes de caractérisation
- [25] **P.Konttinen, P.D.Lund, R.J.Kilpi**, Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces, Solar Energy Materials & Solar Cells 79 pp. 273–283, 2003
- [26] **P.Konttinen, R.J.Kilpi, P.D.Lund**, Microstructural analysis of selective C/Al₂O₃ solar absorber surfaces, reprinted with permission from thin films 425, numbers 1-2, pp. 24-30, 2003.
- [27] **P.Konttinen, P.D.Lund**, physical interpretation of impacts from a low cost manufacturing process on the surface microstructure of a novel solar absorber, Advanced Energy Systems Laboratory, Helsinki University of Technology, p.O.Box 2200, Fin 02015 HUT, Finland.
- [28] **R BERNARD, G MENGUY et M SCHWARTZ**, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application, Editions Tec et Doc.

Résumé

Une modélisation qui nous permet une prédiction précise des performances thermiques et optiques de l'absorbeur d'un convertisseur héliothermique est obtenue dans notre étude. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence significative des propriétés optiques et thermiques sur le rendement radiatif de l'absorbeur. Les effets antagonistes de la sélectivité de la surface et de la concentration du rayonnement solaire sur sa performance exigent de faire intervenir les propriétés thermodynamiques de la surface de l'absorbeur compatibles avec ses propriétés optiques pour en déduire une corrélation entre elles donnant ainsi un rendement radiatif optimal. La méthode s'est basée sur l'analyse du bilan thermique général d'un convertisseur thermique. Le résultat ainsi obtenu se concorde bien avec les travaux rencontrés dans la littérature.

Mots clés: rendement radiatif, longueur de coupure, sélectivité, concentration, énergie solaire

Abstract

The aim of this study is to model the thermal and optical properties of the absorber surface of a solar converter. Its properties have a significant influence on the irradiative efficiency of the absorber. The surface selectivity and the solar radiation concentration have an antagonistic effect on this efficiency. This why, the surface thermodynamic properties of the absorber should be compatible with its optical properties? It is aimed to use the developed model to deduce correlations between those properties. The method is based on the analysis of the heat balance of a solar converter. The results so obtained are in good agreement with results from literature.

Key words: irradiative output, cutting length wave, selectivity, concentration, solar energy.

المخلص

الهدف من هذه الدراسة إيجاد نموذج من شأنه أن يسمح لنا بالتنبؤ الدقيق للأداء الحراري والضوئي للامتصاص من محول الحرارة في دراستنا. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها التأثير الكبير للخصائص الحرارية والضوئية على الكفاءة الإشعاعية للممتص الحراري. آثار معاكسة لانتقائية السطح وتركيز الإشعاع الشمسي على أدائها تتطلب تدخل من الخصائص الحرارية من سطح الامتصاص التي تتسجم مع الخصائص البصرية لاستنتاج وجود رابطة بينهما يعطي كفاءة الإشعاعي على النحو الأمثل. وتعتمد هذه الطريقة على تحليل التوازن الحراري للمحول الحرارة. النتائج المحصلة عليها والتي تتفق مع الأعمال العلمية المقدمة في المراجع.

الكلمات المفتاحية, الكفاءة الإشعاعية, طول الموجة القطعي, الانتقائية, التركيز, الطاقة الشمسية.