

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTERE

Spécialité : **MECANIQUE**

Option : **ENERGETIQUE**

PAR

Kalla Fayçal

THEME

Conversion thermodynamique de l'énergie solaire:
Etude et modélisation d'un capteur solaire

SOUTENU LE 15/01/2014.

Membres du jury :

M. Si Ameur	Président	Professeur	Univ. Batna
Z. Aouachria	Rapporteur	M.C	Univ. Batna
C. Bougriou	Examineur	Professeur	Univ. Batna
A. Omara	Examineur	M.C	Univ. Constantine

Sommaire

Nomenclature générale

Introduction générale	7
------------------------------------	----------

Chapitre 1. Généralités et synthèses bibliographique

1.1. Introduction.....	9
1.2. Classification des énergies renouvelables.....	9
1.2.1. Les énergies géothermiques.....	9
1.2.2. Les énergies gravitationnelles	9
1.2.3. Les énergies solaires... ..	9
1.3. Utilisation directe de l'énergie solaire.....	10
1.3.1. L'énergie solaire photovoltaïque.....	10
1.3.2. L'énergie solaire thermique.....	11
1.3.2.1. Les capteurs plans	11
1.3.2.2 Les capteurs à concentration.....	12
1.4. Synthèses bibliographique.....	12

Chapitre 2. Étude théorique d'un convertisseur héliothermique

2.1 Introduction.....	15
2.2 Les capteurs solaires thermiques.....	15
2.2.1 Les capteurs non-vitrés.....	15
2.2.2 Les capteurs à tubes sous vides.....	16
2.2.3 Les capteurs plans vitrés.....	17
2.3 Les composants d'un capteur plan.....	18
2.3.1 L'absorbeur.....	18
2.3.1.1 La couche sélective de l'absorbeur.....	19
2.3.2 La couverture transparente (vitrage).....	21
2.3.3 L'isolation thermique.....	22
2.3.4 Le cadre.....	23
2.4 Principes de fonctionnement d'un capteur solaire.....	23
2.5 Capteur à concentration (solaire thermodynamique).....	23

2.5.1 Les systèmes de concentration.....	24
2.6 Gisement physique.....	25
2.6.1 Réception du rayonnement par un solide.....	26
2.7 Transfert de chaleur par rayonnement.....	27
2.7.1 Généralités et Définitions.....	27
2.7.2 Le rayonnement.....	27
2.7.3 Structure du rayonnement.....	28
2.7.4 Spectre du rayonnement.....	29
2.7.5 Longueur d'onde approximative dans le spectre solaire.....	29
2.7.6 Les grandeurs énergétiques.....	30
2.8 Corps noir.....	31
2.8.1 Loi de Kirchoff.....	31
2.8.2 Rayonnement du corps noir.....	31
2.9 Corps gris.....	33
2.9.1 Rayonnement des corps non noir.....	33
2.10 Constante solaire.....	34

Chapitre 3. Analyse et modélisation d'un absorbeur héliothermique

3.1 Introduction.....	36
3.2 Analyse thermique de l'absorbeur.....	36
3.2.1 Bilan thermique de l'absorbeur.....	37
3.2.2 Le rendement radiatif.....	38
3.3 Modélisation de la surface de l'absorbeur.....	39
3.3.1 Caractéristiques de la surface sélective.....	43
3.3.1.1 Optimisation de la longueur d'onde de coupure.....	43
3.3.1.2 La valeur limite de la température d'absorbeur.....	45
3.4 Simulation des propriétés de l'absorbeur.....	48
3.4.1 Rappel théorique.....	48
3.5 Organigramme.....	50

Chapitre 4. Résultats et discussions

4.1 La sélectivité idéale.....	56
4.1.1 L'influence de la température de fonctionnement sur le (η_R / A) pour T voisine de T_a	56

4.1.2 L'influence de la température de fonctionnement sur le (η_R / A).....	57
4.1.3 L'influence de la concentration sur le (η_R / A).	58
4.2 Sélectivité moyenne.....	59
4.2.1 L'influence de la sélectivité sur le rendement pour T très proche de T_a	59
4.2.2 L'influence de la sélectivité sur le rendement pour différentes températures de fonctionnement.....	60
4.2.3 L'influence de la concentration sur le rendement pour différentes valeurs de sélectivité.....	61
4.3 Optimisation de la longueur d'onde de coupure.....	63
4.3.1 Etude de la sélectivité en fonction des températures de fonctionnement moyennes pour différentes zones.....	65
4.4 Calcul de la température limite.....	68
Conclusions	71
Références bibliographiques	72

Nomenclature générale

symbole	désignation	unité
C	Vitesse de la lumière dans le vide [3×10^8]	[m.s ⁻¹]
C ₁	Constante de Planck [$3,742 \cdot 10^{-16}$]	[W.m ⁻²]
C ₂	Constante de Planck [$1,4385 \cdot 10^{-2}$]	[m.K]
E _S	La puissance incidente du soleil par unité de surface	[W/m ²]
K	La fraction d'énergie émise par l'absorbeur	...
K _S	Fraction d'énergie solaire absorbée par l'absorbeur	...
L	La luminance d'un corps	[Wm ⁻² Sr ⁻¹ m ⁻¹]
M	L'émitance énergétique d'un corps	[W/m ²]
M _λ (T)	Emitance monochromatique de l'absorbeur	[W/m ³]
M _λ (T _S)	Emitance monochromatique du soleil	[W/m ³]
P _C	Les pertes d'énergie par convection et conduction	[W/m ²]
s	Le paramètre de la sélectivité de la surface	...
S _a	Surface de l'absorbeur	[m ²]
S _r	Surface du réflecteur	[m ²]
T	Température de d'équilibre de l'absorbeur	[K]
T _a	Température ambiante	[K]
T _{en}	Température d'environnement	[K]
T _l	Température limite de la surface de l'absorbeur	[K]
T _S	Température du soleil	[K]
X	Concentration des rayons solaire	...
η	Rendement thermique de l'absorbeur	...
η _R	Rendement radiatif de l'absorbeur	...

λ	Longueur d'onde	[μm]
λ_C	Longueur d'onde de coupure	[μm]
λ_{Cop}	Longueur d'onde de coupure optimale	[μm]
σ	Constante de Stefan –Boltzmann [$5,6697 \cdot 10^{-8}$]	[$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]
ε	Facteur total d'émission de l'absorbeur	...
$\varepsilon_{\lambda,T}$	Facteur d'émission monochromatique de l'absorbeur	...
α	Facteur total d'absorption de l'absorbeur	...
α'	facteur d'absorption de l'énergie émise par l'environnement	...
$\alpha_{\lambda,T}$	Facteur d'absorption monochromatique de l'absorbeur	...
τ	Coefficient de transmission d'énergie incidente	...
ρ	Coefficient de réflexion d'énergie incidente	...
φ	Le Flux de chaleur transmis par rayonnement solaire	[W]
φ_U	Le flux de chaleur utile	[W]

Introduction générale

*L*e monde connaît depuis plus d'un siècle une importante croissance de la demande énergétique ou cette demande a été couverte par l'énergie fossile. Les sources d'énergie utilisées jusqu'ici arrivent à leurs limites. D'un côté, en raison de l'exploitation toujours plus onéreuse des gisements de (charbon, pétrole et gaz naturel). De l'autre, en raison des changements climatiques planétaires liés aux rejets de dioxyde de carbone provenant de la combustion d'énergies fossiles.

L'utilisation de l'énergie fossile répond de plus en plus à une consommation plus forte ce qui nous oblige à poncer d'autres énergies qui sont disponibles et d'un potentiel qui pourrait dépasser largement nos besoins, ce qui nous amène aujourd'hui à privilégier l'utilisation d'énergies renouvelables et nous conduit donc fatalement à un fort développement des énergies renouvelables. Ces énergies renouvelables diffèrent par leurs origines .

Les capteurs solaires thermiques sont généralement considérés comme un moyen énergétiquement efficace pour récupérer l'énergie émise par le soleil. Un large spectre d'application en découle : production d'eau chaude sanitaire, production de chaleur en masse pour l'industrie, désaliénation d'eau de mer ou encore production de thermoélectricité.

Un des éléments clés dans le développement de ces différentes technologies est la qualité de la couche noire de l'absorbeur solaire qui doit capter un maximum d'énergie incidente sans en réémettre sous forme infrarouge (sélectivité). En plus d'un rendement thermique optimal, la résistance à la chaleur et à la corrosion sont des propriétés cruciales à vérifier [Martin Joly \[1\]](#).

Le but de ce travail est la modélisation et l'optimisation d'un absorbeur d'un capteur solaire. On attend de cette étude une modélisation mathématique, à laquelle on veut aboutir, qui nous permettra une prédiction précise des performances thermodynamique et optique de l'absorbeur.

Les propriétés optiques et thermiques ont des influences significatives sur le rendement radiatif de l'absorbeur. La concentration de l'énergie sur l'absorbeur augmente sa température qui défavorise la contribution de la sélectivité de la surface de l'absorbeur. Il en résulte des effets antagonistes de la sélectivité de la surface de l'absorbeur et la concentration du rayonnement solaire sur celle-ci. Ceci exige de faire intervenir les propriétés thermodynamiques de la surface de l'absorbeur

compatibles avec ses propriétés optiques pour en déduire une certaine corrélation entre elles et donnant ainsi un rendement radiatif optimal.

Le problème se situe alors à prévoir les paramètres optimums du capteur pour différentes conditions de fonctionnement normal du capteur dans différentes zones.

Structure du mémoire :

Notre étude est présentée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les énergies renouvelables, ainsi que leurs applications. Une synthèse bibliographique sur les capteurs solaires est également présentée.

Le deuxième chapitre présente une étude théorique d'un convertisseur héliothermique

Le troisième chapitre présente une analyse théorique sur l'absorbeur d'un convertisseur héliothermique et la modélisation du problème

Le dernier chapitre est consacré aux résultats numériques avec des interprétations et des discussions.

Chapitre 1. Généralités et synthèses bibliographique

Etude bibliographique

1.1 Introduction

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère. Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électrique et de l'énergie thermique.

1.2. Classification des énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation.

Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes. Les énergies renouvelables peuvent être utilisées de différentes formes *Th.Alian* [2].

1.2.1 L'énergie géothermique : C'est une énergie d'origine thermique qui est à l'origine des interactions entre différentes couches souterraines due au mouvement relatif de ces dernières. IL en résulte alors de la chaleur sous forme de vapeur ou du fluide de haute température qui se dégage de l'écorce terrestre.

1.2.2 L'énergie gravitationnelle : Est due à l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil, qui se manifestent par les marées (forme d'énergie potentielle) et certains courants marins (forme d'énergie cinétique).

1.2.3 L'énergie solaire : Elle est issue du fonctionnement de la machine atmosphérique solaire qui se manifeste par son rayonnement dans l'univers. Elle se trouve sous différentes composantes comme : énergie de la biomasse, l'énergie des vagues marines, énergie hydraulique, énergie thermique, énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Cette énergie possède une potentialité pratiquement supérieure à celles des deux autres formes d'énergies renouvelables. C'est elle qui pose le plus

grand nombre de problèmes techniques et économiques mais c'est t'aussi la plus intéressante par ses potentialités importantes.

1.3 L'utilisation directe de l'énergie solaire

Ce qui nous intéresse c'est l'utilisation directe de 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 est actuellement exploitée selon deux techniques : la conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques (conversion hélio- thermique), et sa transformation en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques (conversion électrique).

Ces transformations ont permis le développement de 3 filières d'exploitation :

- pour la chaleur : solaire thermique
- pour l'électricité : solaire thermodynamique
- pour l'électricité : solaire photovoltaïque

1.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque : Cette énergie est découverte en 1839 par Henry Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Il repose sur la technologie des semi-conducteurs.

Cette conversion repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge dans un matériau. Le rendement de conversion varie de 5 à 15 %, selon le type de cellules utilisées.

Le semi-conducteur utilisé dans pratiquement la totalité des cellules actuelles est du silicium de haute pureté avec des épaisseurs d'environ 300 microns. On distingue deux grandes familles de technologies [M. WOLF \[3\]](#) :

* **Le silicium amorphe** : les moins coûteuses, les cellules amorphes sont utilisées lorsqu'une alternative économique est recherchée ou lorsque les besoins en électricité sont faibles (alimentation de montres, calculatrices, luminaires de secours...). Leur rendement est 2 fois moins bon que celui du silicium cristallin et ces cellules sont de moins en moins employées.

* **Le silicium cristallin** : c'est une technologie éprouvée et robuste qui permet d'obtenir des rendements autour de 15 % et représente 90 % de la

production mondiale. Le silicium multi cristallin est moins onéreux et également moins efficace que le monocristallin. Il nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie pour sa production et génère moins de déchets de coupe. Les cellules en silicium multi cristallin sont aujourd'hui les plus utilisées.

Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille. La production électrique des modules PV étant liée à leur température de fonctionnement, le risque de surchauffe peut engendrer une perte importante de rendement. Dans ce contexte particulier, [H. A. Zondag et al. \[4\]](#), à montre que l'utilisation de capteurs hybrides Photovoltaïque-Thermique (PV-T) peut permettre l'évacuation et la valorisation de la chaleur résiduelle. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau [H. A. Zondag et al. \[4\]](#) et [A.Hegazy. \[5\]](#), air [Y.B. Assoa et al. \[6\]](#), ou bi-fluide [B. Robles et al. \[7\]](#)) et selon le type d'absorbeur (plan [H. A. Zondag et al. \[4\]](#), concentrateur [A.Hegazy. \[5\]](#)).

On peut résumer les avantages de combiner un collecteur thermique avec un panneau PV dans l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïques et thermiques) séparément installés [B. Robles et al \[7\]](#).

1.3.2 L'énergie solaire thermique : Le solaire thermique actif permet de transmettre la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage.

Les principaux types de capteurs solaires thermiques sont les suivants :

1.3.2.1 Les capteurs plans : Trois fonctions incombent à ces capteurs, absorber le rayonnement solaire, le transformer en chaleur et transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse ; cette surface doit être douée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible. Pour limiter les pertes par rémission de rayonnement infrarouge, il importe que l'absorbeur possède

aussi la propriété d'émission superficielle la plus faible possible. Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de « sélectif ».

1.3.2.2 Les capteurs à concentration : Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindre-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil.

Avec les capteurs plans on obtient de l'eau chaude à basse température, raison pour laquelle sont très utilisés pour des petits ou moyens systèmes de production d'eau chaude sanitaire, qui sont ainsi appelés chauffe-eau solaires. Les capteurs à concentration, par contre, chauffent le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) à hautes températures (environ 400°C pour les cylindre-paraboliques et 1500°C pour les paraboliques), et sont ainsi plus adaptés pour la production de chaleur industrielle et d'électricité [M. Antonio \[8\]](#).

Synthèse bibliographie

Parmi les applications de l'utilisation de cette énergie renouvelable (héliothermique). De nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer le rendement des capteurs héliothermique.

L'un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques réalisés avec le fluide caloporteur, et pour l'amélioration des performances des capteurs thermiques solaires il est de prendre en compte plusieurs facteurs intervenant dans le phénomène de transfert de chaleur tels que :

- La limite des déperditions thermiques entre l'absorbeur et le milieu ambiant.
- Le bon choix des composants des capteurs.
- L'optimisation des propriétés de la surface de l'absorbeur.

Plusieurs travaux dans ce domaine se sont basés surtout sur les divers critères qui doivent intervenir lors du choix d'une surface sélective pour une

stabilité dans le temps et d'un coût acceptable, Qui se base sur l'étude de l'évolution des propriétés optiques des différents matériaux avec la température, en distinguant les effets dus à des changements de structure diffusion inter faciale, réactions chimiques. Cet effort, faisant appel à la fois à une connaissance approfondie des propriétés optiques des solides et à des techniques de caractérisation physico-chimiques variées, devrait permettre d'améliorer les solutions existantes et d'en trouver de nouvelles, en particulier pour la sélectivité à haute température [J. Spitz \[9\]](#). D'autre par l'analyse des données théoriques et expérimentales concernant l'influence des surfaces sélectives sur l'efficacité des récepteurs solaires plans montre que l'application des revêtements sélectifs augmente l'efficacité du récepteur solaire plan lorsque la température de sa surface atteint $60^{\circ}\text{-}70^{\circ}\text{C}$ pour des température plus basses il est plus rentable d'utiliser la surface noire [G.Gouhman et al \[10\]](#). D'autres études montrent sur des exemples théoriques très proches de la réalité l'intérêt des surfaces sélectives associées à de tels capteurs photo thermiques travaillant sous faible ou moyenne concentration jusqu'à 250°C que le Chrome Noir était un bon matériau sélectif particulièrement dans ce domaine de températures, [J. Lafait et al \[11\]](#). D'autres chercheurs se sont penchés dans leurs études sur les performances des capteurs héliothermiques, soit sur l'amélioration du contact entre le fluide caloporteur et l'absorbeur pour diminuer la résistance thermique de l'interface des deux systèmes d'échangeurs, [A. Khouya et Al \[12\]](#). Et par l'augmentation de la surface totale d'échange entre l'absorbeur et le fluide caloporteur [F. Menasria et Al \[13\]](#). Soit en agissant sur les divers paramètres gouvernant le phénomène de transfert de chaleur et de masse tels que la température d'entrée du fluide, sa vitesse et la hauteur d'écoulement sur les performances thermiques du capteur solaire (analyse thermique) [S. Oudjedi \[14\]](#).

D'autres études, sur L'emploi des surfaces sélectives absorbantes, permettent d'augmenter notablement le rendement radiatif des capteurs plans ou à concentration, mais ils sont assez compliqués et couteux. Afin d'optimiser l'absorption solaire des revêtements, les différents paramètres tels que la concentration des composantes des revêtements ont été étudiés [P. Oelhafen \[15\]](#), [T. Bostrom et al \[16\]](#), et [Chao-Ching Chang et al \[17\]](#).

En fin d'autres études théoriques en cette base sur le rôle de la sélectivité et de la concentration solaire ou le bilan thermique d'un convertisseur thermique de l'énergie solaire dépend de nombreux paramètres comme propriétés optiques de l'absorbeur, température de fonctionnement, concentration du rayonnement, coefficient de transfert convectif, etc... ; L'influence de ces paramètres est difficile à estimer a priori, pour un bilan thermique de convertisseur de l'énergie thermique [A.Arconada et Al \[18\]](#), et [Z. Aouachria \[19\]](#).

Nous savons que La conception d'un convertisseur thermique de l'énergie solaire nécessite une analyse du bilan thermique compte tenu des conditions de son utilisation. Une telle analyse ne peut être effectuée qu'à partir d'un modèle permettant d'évaluer l'influence des divers paramètres caractéristiques du dispositif. C'est dans cet objectif que nous avons effectué une étude générale du bilan thermique d'un convertisseur faisant intervenir les propriétés de sélectivité de la surface absorbante et la concentration du rayonnement solaire. Les propriétés optiques de la surface absorbante peuvent être modélisées par le graphe de la figure 1

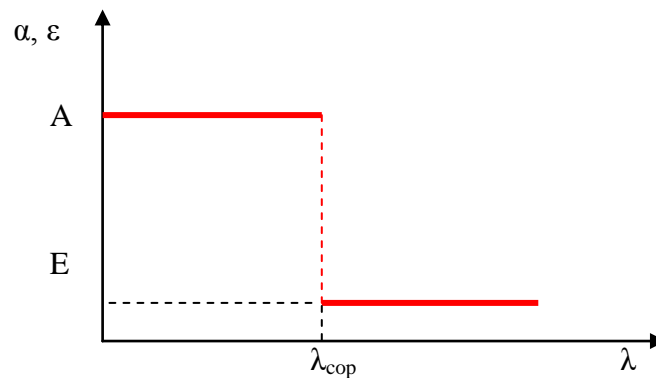


Fig.1 : Modélisation des propriétés optiques de l'absorbeur : variation du facteur d'absorption monochromatique avec la longueur d'onde.

Dans notre étude, nous allons tenir compte de la propriété thermodynamique essentielle de la surface de l'absorbeur, T , et ses propriétés optiques afin de d'aboutir aux bonnes performances de notre capteur pour différentes conditions de fonctionnement normal.

Chapitre 2. Étude théorique d'un convertisseur héliothermique

2.1 Introduction

L'une des manières d'utiliser l'énergie solaire est d'exploiter cette énergie transformée en chaleur. Cette technique est donc appelée solaire thermique. On peut de cette manière utiliser l'énergie solaire pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire. Une autre application consiste à concentrer le rayonnement solaire pour obtenir des hautes températures et produire ainsi de l'énergie mécanique et électrique par l'intermédiaire d'une machine thermique (turbine à gaz ou à vapeur) : c'est la technique solaire thermodynamique.

2.2 Les capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre. Le type d'application peut aller du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité. Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigel, un fluide à changement de phase, une huile qui se ne dégrade pas à haute température. La majeure partie des applications est celle du chauffage de l'eau sanitaire et celui du chauffage des locaux, avec des fluides caloporteurs liquides.

Les capteurs à liquide se répartissent en trois familles :

2.2.1 Les capteurs non-vitrés

par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple réseau de tubes plastiques noirs, utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été , ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines .



Fig.2 : Capteur moquette pour le chauffage des piscines

2.2.2 Les capteurs à tubes sous vides

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

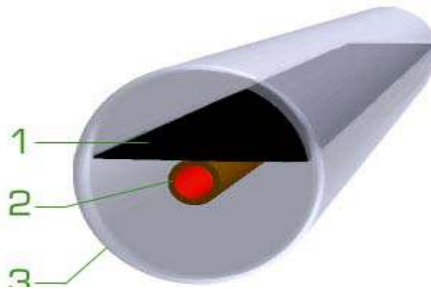


Fig.3 : Capteur sous vide

- 1- Absorbeur
- 2- échangeur
- 3- tube transparent

Il y a 4 familles de capteurs sous vide, et chacun dépend d'une technique spécifique :

- a. Le capteur à tube sous vide à circulation directe
- b. Le capteur à tube sous vide à " Caloduc"
- c. Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos"
- d. Le capteur à tube sous vide "Schott"

2.2.3 Les capteurs plans vitrés

L'application la plus courante du solaire thermique est le chauffe-eau solaire. On peut aussi recourir au solaire thermique pour le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère). Les systèmes solaires sont également utilisés pour le chauffage des piscines, les chauffe-eaux des hôtels, des hôpitaux, le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage (au lieu de l'air conditionné), le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare. La figure 4 montre une structure d'un capteur solaire à vitre.

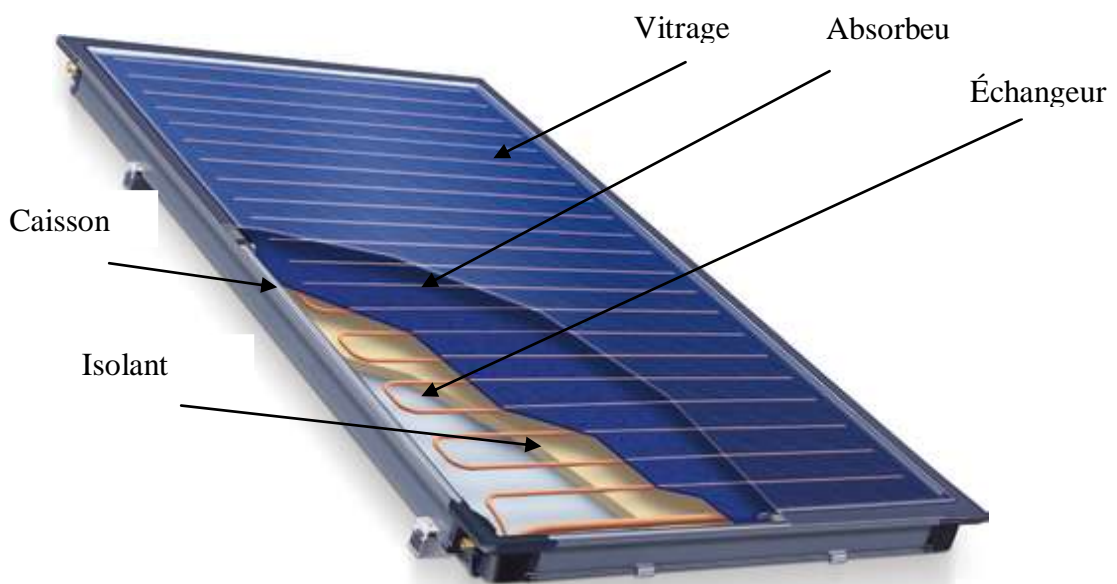


Fig.4 : Schéma d'un capteur solaire vitré.

2.3 Les composants d'un capteur plan

2.3.1 L'absorbeur

Dans tout capteur, l'absorbeur joue le rôle principal. Le choix du matériau et le mode de construction ont une grande influence sur la performance du capteur. Les premiers absorbeurs étaient peints en noir afin de capter un maximum d'énergie rayonnée du soleil. Mais cette couleur a l'inconvénient d'avoir un rayonnement important, ce qui finit par échauffer la vitre et provoquer des pertes à travers celle-ci par une forte réémission. C'est pourquoi on préfère utiliser des absorbeurs traités, ce qui donne un corps noir dont le rayonnement est beaucoup plus faible. On parle de surfaces sélectives. Un des éléments clefs dans le développement de ces différentes technologies. D'autre part il doit absorber la plus grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec le minimum de perte. Il doit être le plus léger possible pour éviter l'inertie de mise en régime et construit avec un matériau bon conducteur et fiable dans le temps. On distingue plusieurs modes de construction :

- **L'absorbeur à ailettes** : Est constitué d'un tube, généralement en cuivre, sur lequel sont fixées des ailettes en cuivre, acier ou aluminium. Le liquide caloporteur circule dans les tubes (fig.5).

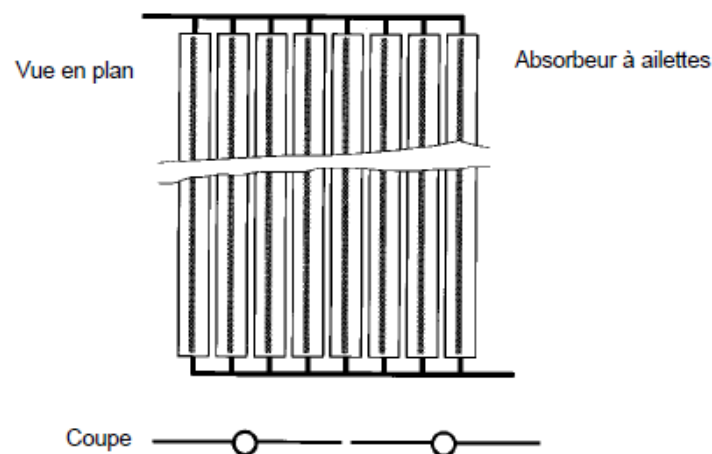


Fig.5 : Absorbeur à ailettes

- **L'absorbeur à coussin** est constitué de deux tôles en acier ou en acier inoxydable, soudées l'une à l'autre suivant un dessin bien précis. Le liquide caloporteur circule dans l'espace aménagé entre les tôles et irrigue ainsi pratiquement toute la surface de l'absorbeur (fig. 6).

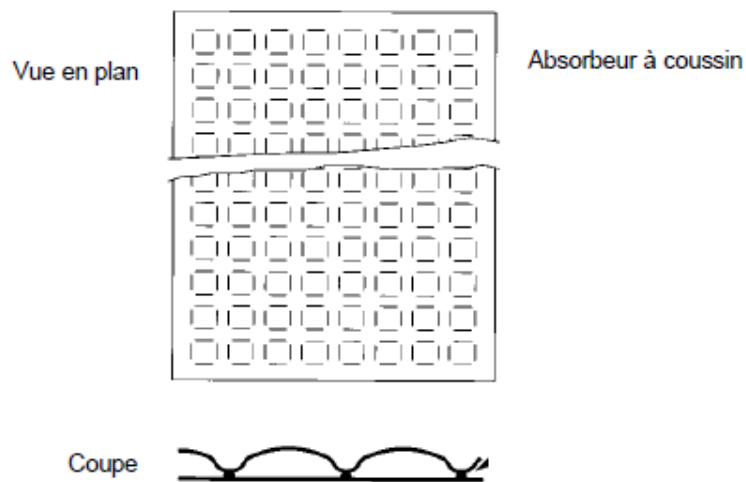


Fig.6 : Absorbeur à coussin

- **L'absorbeur «Roll bond»** est constitué, tout comme l'absorbeur à coussin de deux tôles, mais cette fois en aluminium, assemblées selon le système «Roll bond». Dans ce système de construction le liquide caloporteur circule dans les canaux aménagés entre les deux tôles assemblées (fig. 7).

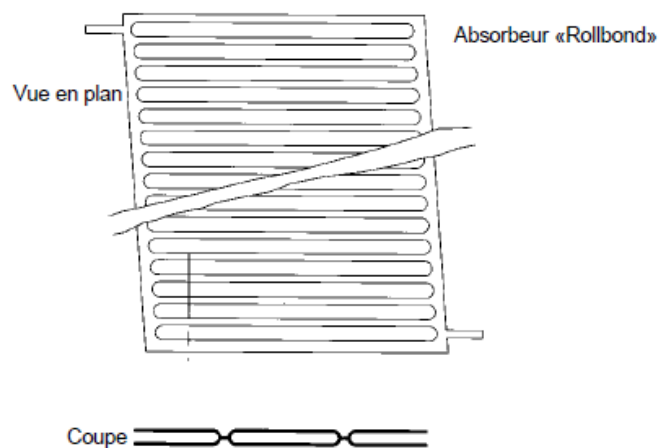


Fig.7 : Absorbeur Roll bond

2.3.1.1 La couche sélective de l'absorbeur

Un absorbeur, dont la température s'élève grâce à sa couche absorbante, va forcément perdre de l'énergie par convection et par rayonnement. La quantité dissipée par rayonnement représente une part importante des pertes de chaleur. La part convective des déperditions dues à la température extérieure et au vent n'est pas permanente. En revanche celles par rayonnement, d'un absorbeur exposé à la température très basse du ciel clair, sont continues.

En effet, tout corps à température k° non nulle émet un rayonnement électromagnétique analogue à la lumière, appelé rayonnement thermique. Il est émis dans une large bande de longueurs d'ondes dont la position dépend de la température du corps. Par exemple, le soleil qui a une température de surface de 6000 K émet entre 0,2 et 2,5 (μm), avec un maximum à 0,55 (μm). Par contre, la surface d'un absorbeur à 100°C émet dans une bande située dans l'infrarouge (IR) lointain, allant de 2,5 à 40 (μm), avec un maximum vers 8 (μm).

Il est possible de fabriquer des surfaces qui sont noires, donc très absorbantes pour le rayonnement solaire, et qui sont réfléchissantes, donc peu émissives, dans la bande de l'infrarouge lointain. Ces surfaces sont dites sélectives. Les paramètres caractéristiques de ces surfaces sont leur coefficient d'absorption α dans le spectre solaire qui est idéalement de 100% ($\alpha = 1$) et la part résiduelle du rayonnement émis par rapport au maximum possible, que l'on appelle émissivité ε . La valeur maximale de l'émissivité est de 100% ($\varepsilon = 1$), et devrait être nulle ($\varepsilon = 0$) pour une surface sélective idéale [20].

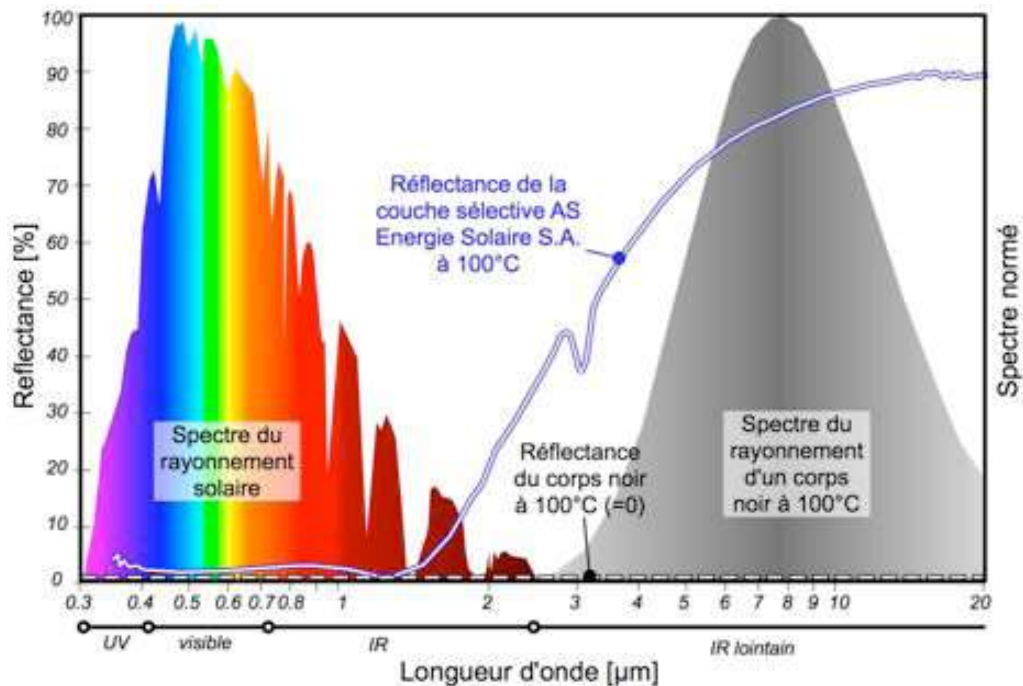


Fig.8 : Longueur d'onde approximative pour différentes réflectance

2.3.2 La couverture transparente (vitrage)

Pour cette couverture on utilise principalement du verre sécurisé résistant aux chocs et contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage). Ce verre est de préférence pauvre en oxyde de fer et de ce fait il est très transparent au rayonnement solaire. Dans le cas de capteurs intégrés dans la toiture on utilise aussi parfois des matières synthétiques.

Le verre présente une bonne résistance au vieillissement (principalement par les rayons UV) et une bonne résistance mécanique. Les couvertures en matière synthétique sont moins durables. Elles sont par contre plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse la fraction réfléchi du rayonnement solaire incident, afin de diminuer l'éblouissement éventuel (fig. 9).

On distingue les capteurs avec un seul vitrage et revêtement sélectif de l'absorbeur, et ceux avec deux vitrages mais sans revêtement sélectif de l'absorbeur.

Les capteurs plans à vide d'air partiel appartiennent à la première catégorie ; le vide partiel sert d'isolant : il réduit les pertes par convection à l'intérieur du capteur.

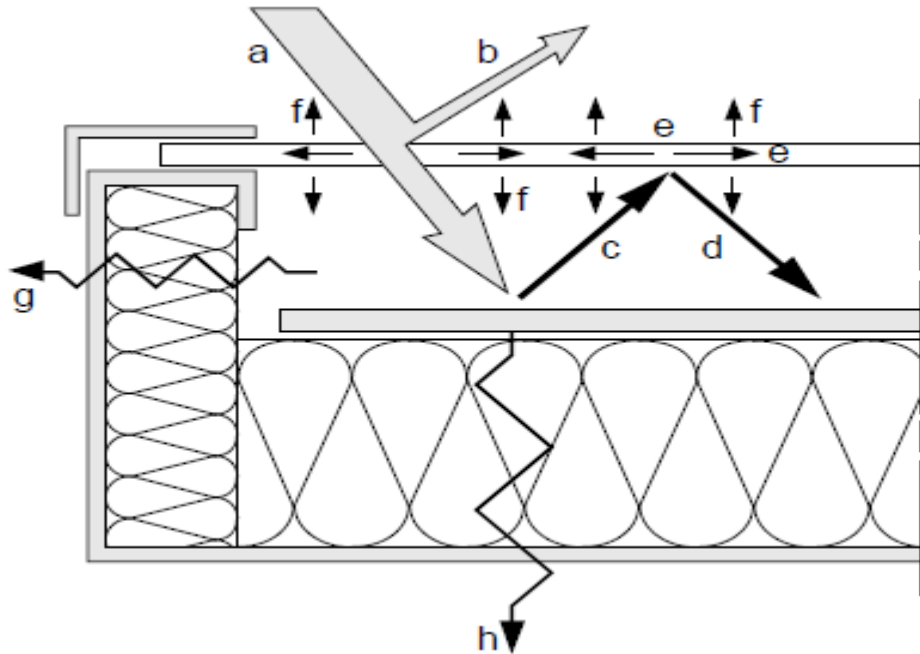


Fig.9 : Echanges thermiques dans un capteur plan

- a. Rayonnement solaire incident
- b. Rayonnement solaire réfléchi par le vitrage
- c. Rayonnement thermique émis par l'absorbeur
- d. Rayonnement thermique réfléchi par le vitrage
- e. Rayonnement thermique absorbé par le vitrage
- f. Rayonnement thermique émis par le vitrage
- g. Pertes thermiques latérales
- h. Pertes thermiques inférieures

2.3.3 L'isolation thermique

Les matières isolantes utilisées dans la construction des capteurs sont soit des laines minérales (laine de roche et laine de verre) soit des matières synthétiques. L'isolation doit être imputrescible et résister aux hautes températures à l'intérieur du capteur.

Une isolation de ce type est inutile dans le cas des capteurs à tubes évacués puisque c'est le vide d'air dans les tubes qui crée l'effet isolant.

2.3.4 Le cadre

Le cadre doit résister aux agressions des conditions extérieures, aux contraintes intérieures et aux chocs éventuels lors du transport et du montage. Il doit donc être solide, tout en étant le plus léger possible.

Le cadre du capteur est en aluminium ou en acier. Le cadre des capteurs intégrés en toiture est protégé des intempéries et peut ainsi être valablement réalisé en bois.

2.4 Principes de fonctionnement d'un capteur plan solaire

Les capteurs solaires de type plan sont le plus couramment utilisés pour les petites et moyennes puissances. Ils se composent d'un absorbeur, élément essentiel dans la conversion d'énergie solaire, situé dans un coffrage isolé en face arrière et latérale. Il est souvent couvert d'un vitrage en face avant. Cet absorbeur peut être constitué d'une couche sélective qui augmente la captation de l'énergie solaire tout en limitant les pertes par rayonnement. Le vitrage quant à lui évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent et crée un effet de serre qui augmente le rendement du capteur. L'isolation à l'arrière du capteur diminue les pertes de chaleur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.

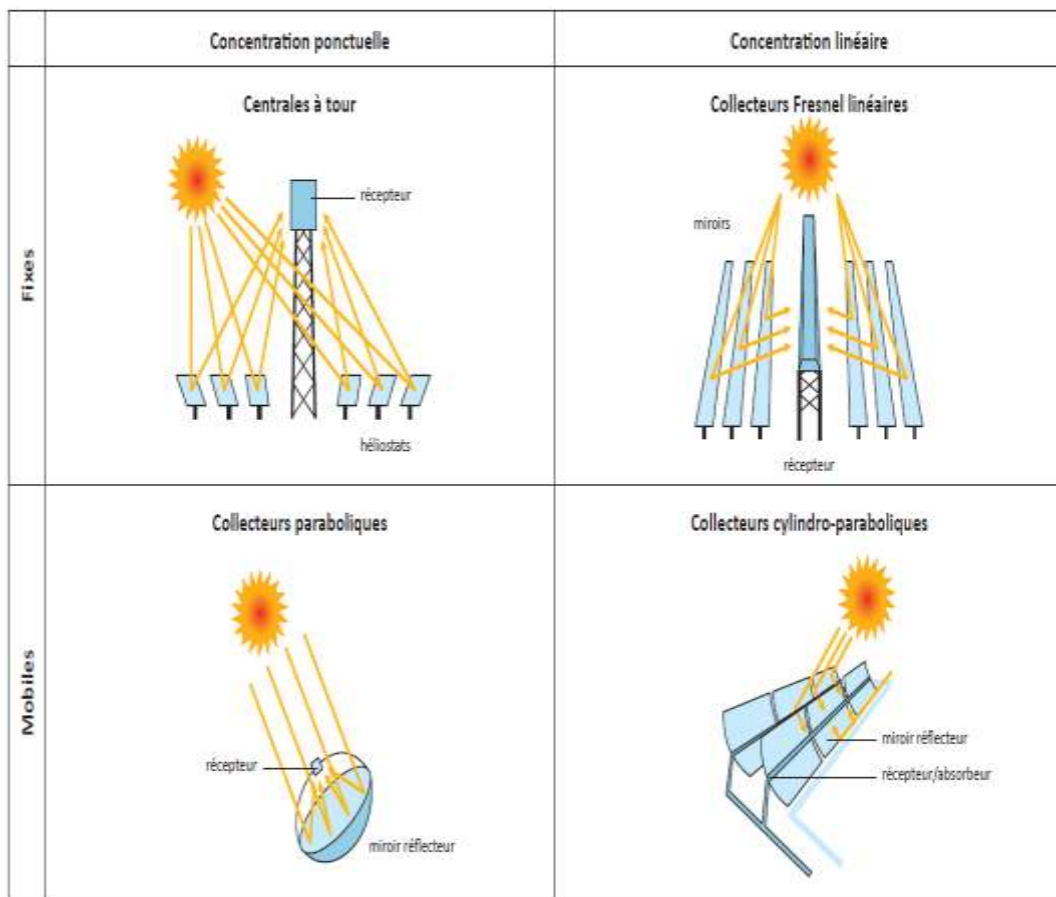
2.5 Capteur à concentration (solaire thermodynamique)

Il est donc nécessaire de concentrer le rayonnement solaire pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité.

Les technologies de concentration solaire se basent sur des collecteurs réflecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent un fluide à haute ou très haute température.

2.5.1 Les systèmes de concentration

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel (Fig.10). Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels.



source : AIE

Fig.10 : capteurs à concentration

2.6 Gisement physique

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 solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global : est la somme du rayonnement direct et diffus.

Le gisement physique brut correspond à l'ensoleillement sur un Corp.

On peut distinguer le rayonnement direct et le rayonnement diffus, en effet :

$$R_g = R_{\text{total}} - R_{\text{réfléchi}} - R_{\text{absorbé}} = R_{\text{direct}} + R_{\text{diffus}}$$

R_g : rayonnement reçu au niveau du sol, après avoir traversé l'atmosphère

R_{total} : rayonnement total, reçu au sommet de l'atmosphère

$R_{\text{réfléchi}}$: rayonnement réfléchi par l'atmosphère

$R_{\text{absorbé}}$: rayonnement absorbé par l'atmosphère

R_{direct} : rayonnement transmis de manière directe

R_{diffus} : rayonnement transmis de manière diffuse

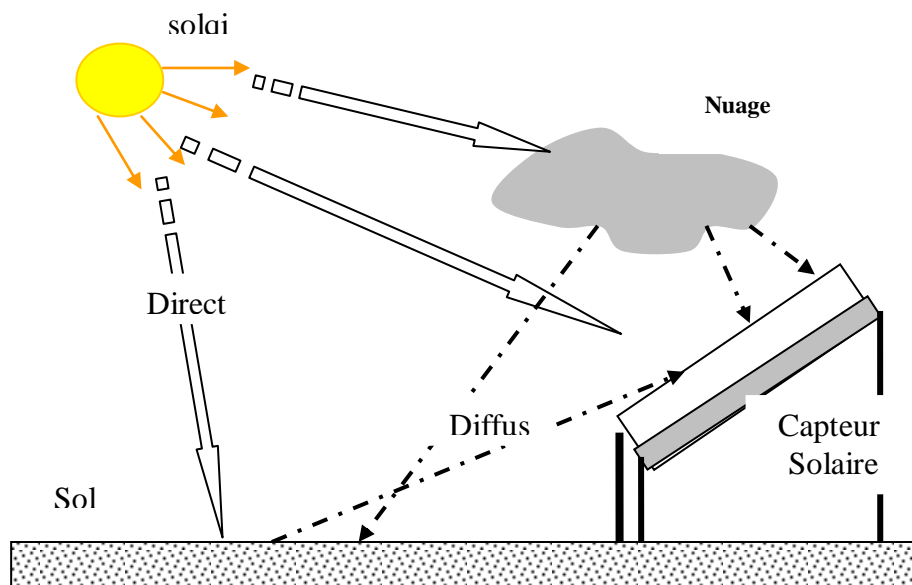


Fig.11 : les différents rayonnements entrant dans le capteur solaire

2.6.1 Réception du rayonnement par un solide

Lorsqu'un rayonnement incident atteint un corps, celui-ci réfléchit une partie du rayonnement (r). Une partie est transmise (t) si le corps est partiellement transparent tandis que le reste de l'énergie du rayonnement incident est absorbé par le corps (α).

La somme des trois fractions d'énergie est égale à 1.

$$\alpha + r + t = 1$$

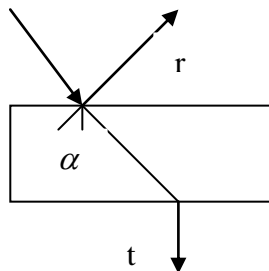


Fig.12 : Réception du rayonnement par un solide

α est nommé le facteur d'absorption du corps: c'est la fraction d'énergie absorbée par rapport à l'énergie incidente.

α est défini pour une longueur d'onde λ donnée.

On comprend donc que le problème du rayonnement thermique est de considérer pour chaque corps l'aspect émetteur et l'aspect récepteur (un corps reçoit un rayonnement émis ou réfléchi par un autre corps).

On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques réfléchissant $\rho_{\lambda T}$, absorbant $\alpha_{\lambda T}$ et filtrant $\tau_{\lambda T}$ qui sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

Si l'on considère l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde, on obtient les pouvoirs réfléchissants ρ_T , absorbant α_T et filtrant τ_T .

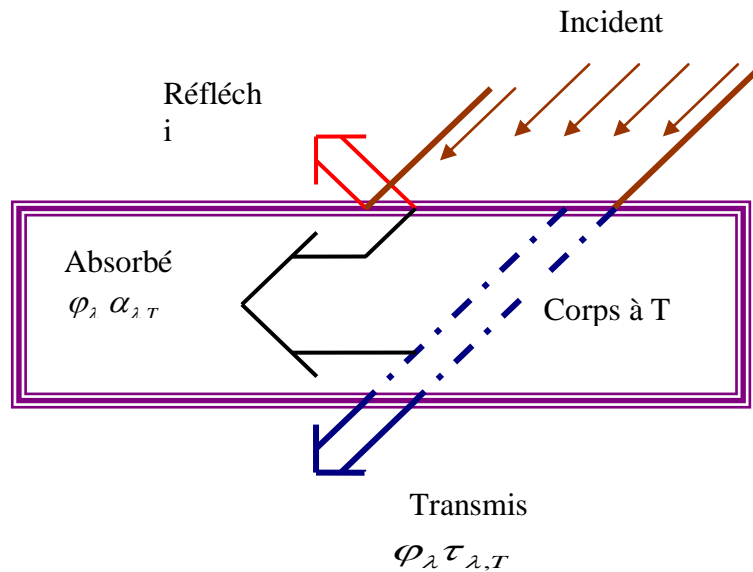


Fig.13 : Réception du rayonnement monochromatique par un solide

On a :

$$\varphi_{\lambda} = \varphi_{\lambda} \rho_{\lambda, T} + \varphi_{\lambda} \alpha_{\lambda, T} + \varphi_{\lambda} \tau_{\lambda, T} \quad (1)$$

$$\text{D'où : } \rho_{\lambda, T} + \alpha_{\lambda, T} + \tau_{\lambda, T} = 1 \quad (2)$$

2.7 Transfert de chaleur par rayonnement

2.7.1 Généralités et Définitions

Tous les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur.

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde.

2.7.2 Le rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). On prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant.

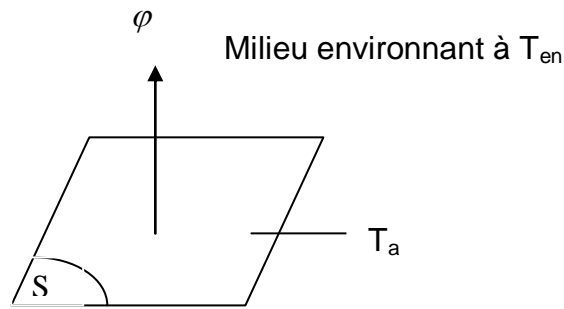


Fig.14 : Rayonnement entre un solide et le milieu environnant.

Dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_P^4 - T_\infty^4)$$

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement

ε_p : Facteur d'émission de la surface

σ : Constante de Stephan

T_a : Température de la surface

T_{en} : Température du milieu environnant la surface

S: Aire de la surface

2.7.3 Structure du rayonnement

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

- ✚ **Emission.** Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique
- ✚ **Transmission** La transmission de l'énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé.
- ✚ **Réception** A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption).

2.7.4 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé d'ondes se propageant à la vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide). On peut les distinguer par leur longueur d'onde λ ou leur fréquence ν , reliées par $c = \lambda \nu$. On rencontre également le nombre d'onde $\nu = 1/\lambda$.

Le rayonnement visible occupe une bande étroite du spectre, aux longueurs d'ondes comprises entre 0,38 et 0,78 μm (figure 15). Les longueurs d'ondes plus courtes (fréquences plus élevées) forment le rayonnement ultraviolet, puis X et γ . Les longueurs d'onde plus longues que le visible forment le rayonnement infrarouge puis micro-onde.

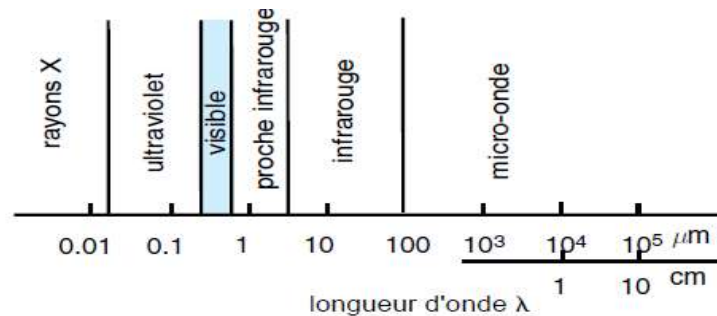


Fig.15 : Classification du rayonnement en fonction de la longueur d'onde

2.7.5 Longueur d'onde approximative dans le spectre solaire

Le maximum d'émission lumineuse du Soleil se situe à une longueur d'onde d'environ 0,5 μm . La partie visible du spectre est comprise entre 0,38 et 0,78 μm (du violet au rouge). Le Soleil émet donc la plus grande partie de son rayonnement dans le visible [20].

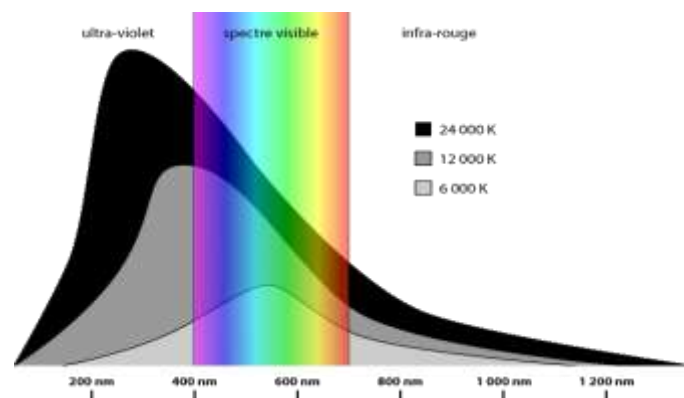


Fig.16 : Longueur d'onde approximative dans le spectre solaire

2.7.6 Les grandeurs énergétiques

✚ **Flux énergétique (Flux radiatif) :** $[\varphi]$ Quantité d'énergie émise par unité de temps par la totalité de la surface de la source dans toutes les directions. S'exprime en joule/seconde, donc en watts : le flux énergétique est la puissance rayonnée par la source.

✚ **Emitance énergétique(Exitance) :** $[M]$ Flux émis par unité de surface de la source.

- Emitance monochromatique : Un élément de surface dS émet, dans toutes les directions d'un hémisphère, un flux d'énergie par rayonnement. Ce flux est réparti sur un intervalle de longueurs d'ondes. Si l'on considère le flux d'énergie $d\varphi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}$ émis entre les deux longueurs d'ondes λ et $\lambda+d\lambda$, on définit l'émitance monochromatique d'une source à la température T ($^{\circ}k$) par :

$$M_{\lambda,T} = \frac{d\varphi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}}{dS d\lambda} \quad (3)$$

- Emitance totale : C'est la densité de flux de chaleur émise par rayonnement par dS sur tout le spectre des longueurs d'ondes. Elle n'est plus fonction que de la température T ($^{\circ}k$) et de la nature de la source

$$M_T = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T} d\lambda \quad (4)$$

✚ **La luminance :** $[L]$

C'est le flux émis par unité de surface apparente, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde. C'est une grandeur directionnelle et monochromatique. Elle s'exprime par :

$$L_{\lambda,\theta} = \frac{d\varphi}{d\Omega dS \cos \theta d\lambda}$$

Comme Elle peut être aussi totale.

$$L_{\theta} = \frac{d\varphi}{d\Omega dS \cos \theta}$$

2.8 Corps noir

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, il est défini par : $\alpha_{\lambda T} = 1$.

Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

Propriétés du corps noir :

- Tous les corps noirs rayonnent de la même manière.
- Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température.

2.8.1 Loi de Kirchoff

A une température $T(^{\circ}\text{k})$ donnée et pour une longueur d'onde λ donnée, le rapport $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}$ est le même pour tous les corps.

Pour le corps noir : $\alpha_{\lambda T} = 1$, le rapport $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}$ est donc égal à $M_{0\lambda T}$ en appelant $M_{0\lambda T}$ l'émitance monochromatique du corps noir, donc : $M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} M_{0\lambda T} (\text{Wm}^{-3})$

L'émitance monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant monochromatique par l'émitance monochromatique du corps noir à la même température, d'où l'intérêt de connaître le rayonnement émis par le corps noir.

2.8.2 Rayonnement du corps noir

Émittance monochromatique

Elle est donnée par la loi de Planck : Cette loi permet de tracer les courbes isothermes représentant les variations de $M_{o\lambda T}$ en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures

$$M_{o\lambda T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (5)$$

Avec : $C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^{-2}$
 $C_2 = 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$

La longueur d'onde λ_M pour laquelle l'émission est maximale varie avec la température de la source :

$$\lambda_M = \frac{2.897 \cdot 10^{-3}}{T}$$

$$M_{o\lambda_M T} = 0.410 \left[\frac{T}{10} \right]^5$$

Pour le Soleil ($T \approx 5777 \text{ K}$), 90% de l'énergie est émise entre 0,31 et 2,5 μm , le maximum étant situé dans le spectre visible.

Émittance totale M_{oT}

L'intégration de la formule de Planck pour toutes les longueurs d'onde donne l'émittance totale M_{oT} du corps noir qui n'est plus fonction que de la température T , on obtient la loi de Stephan-Boltzmann

$$M_{oT} = \sigma T^4 \quad (6)$$

Fraction de l'émittance dans un intervalle donné de longueurs d'onde $[\lambda_1, \lambda_2]$

C'est la fraction du flux émis par l'unité de surface du corps noir à la température T (°k) entre les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 :

$$F_{\lambda_2 T - \lambda_1 T} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{o_{\lambda T}} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{o_{\lambda T}} d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda_2} M_{o_{\lambda T}} d\lambda}{\sigma T^4} - \frac{\int_0^{\lambda_1} M_{o_{\lambda T}} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (7)$$

$F_{0-\lambda T}$ à T (°k) constant

$$F_{0-\lambda T} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda} \frac{C_1 \lambda^{-5} d\lambda}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T}\right] - 1} = \frac{1}{\sigma} \int_0^{\lambda} \frac{C_1 (\lambda T)^{-5} d(\lambda T)}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T}\right] - 1} \quad (8)$$

2.9 Corps gris

Un corps gris est un corps dont le pouvoir absorbant $\alpha_{\lambda T}$ est indépendant de la longueur d'onde λ du rayonnement qu'il reçoit. Il est défini par : $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$. En général, on considère les corps solides comme des corps gris par intervalle et on utilise un pouvoir absorbant moyen vis-à-vis du rayonnement émis pour $\lambda < 3 \mu\text{m}$ (rayonnement émis par des corps à haute température comme le Soleil) et un pouvoir absorbant moyen vis-à-vis du rayonnement émis pour $\lambda > 3 \mu\text{m}$ (rayonnement émis par les corps à faible température : atmosphère, absorbeur solaire,...) [20].

2.9.1 Rayonnement des corps non noirs

Facteur d'émission ou émissivité On définit les propriétés émissives des corps réels par rapport aux propriétés émissives du corps noir dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde et on les caractérise à l'aide de coefficients appelés facteurs d'émission ou émissivités. Ces coefficients monochromatiques ou totaux sont définis par :

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{M_{\lambda T}}{M_{o_{\lambda T}}}$$

$$\varepsilon_T = \frac{M_T}{M_{O_T}}$$

D'après la loi de Kirchoff, on montre que

$$\alpha_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T}$$

Les corps gris ils sont caractérisés par $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$

Soit d'après ce qui précède : $\varepsilon_{\lambda T} = \varepsilon_T$

Or : $M_T = \varepsilon_T M_{O_T}$, nous en déduisons l'émitance du corps gris à la température T (°K) :

$$M_T = \varepsilon_T \sigma T^4 \quad (9)$$

Cas des corps gris : loi de Kirchoff généralisée Dans le cas du corps gris, on peut généraliser cette loi ce qui facilite les applications. En effet pour un corps Gris $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$, donc :

$$M_T = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T} d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda T} M_{O_{\lambda T}} d\lambda = \alpha_T \int_0^{\infty} M_{O_{\lambda T}} d\lambda \quad (10)$$

En appelant M_{O_T} l'émitance totale du corps noir à la température T, nous obtenons pour un corps gris :

$$M_T = \alpha_T M_{O_T} \quad (11)$$

L'émitance totale M_T d'un corps gris à la température T est égal au produit de son pouvoir absorbant α_T par l'émitance totale M_{O_T} du corps noir à la même température.

2.10 Constante solaire :

La chaleur produite par la fusion nucléaire de l'hydrogène au cœur du Soleil traverse de nombreuses couches jusqu'à sa surface (photosphère) pour y être libérée sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules. Ces particules sont essentiellement des photons, la chaleur du Soleil étant convertie en lumière à sa surface. Ce flux de photon forme des ondes électromagnétiques qui se propagent sans perte d'énergie dans toutes les directions de l'espace, et notamment vers la Terre.

La constante solaire est le rayonnement direct I_0 reçu par l'unité de surface placée perpendiculairement aux rayons solaires à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre.

$I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$, [21].

Chapitre 3. Analyse et modélisation d'un absorbeur héliothermique

3.1 Introduction

L'une des manières d'utiliser l'énergie solaire est d'exploiter la chaleur apportée par ses rayons. Cette technique est donc appelée solaire thermique. On peut de cette manière utiliser l'énergie solaire pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire. Une autre application consiste à concentrer le rayonnement solaire pour obtenir des hautes températures et produire ainsi de l'énergie mécanique et l'électricité par l'intermédiaire d'une machine thermique (turbine à gaz ou à vapeur) : c'est la technique solaire thermodynamique.

L'utilisation de l'énergie solaire commence par sa conversion. On distingue deux catégories de système de conversion de l'énergie solaire : à conversion thermique où l'énergie solaire reçue par le plan du collecteur est entièrement transformée en énergie calorifique, et à conversion électrique dit aussi système photovoltaïque, où l'énergie solaire collectée sur le plan du récepteur est transformée en électricité.

3.2 ANALYSE THERMIQUE DE L'ABSORBEUR

L'absorbeur du rayonnement solaire constitue l'élément solaire typique important d'un convertisseur héliothermique fig.17.

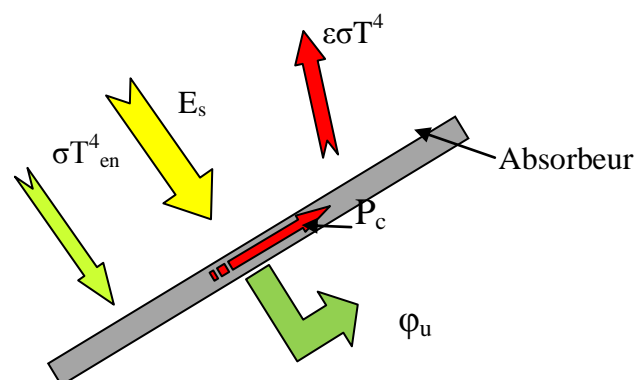


Fig.17 : les différents flux entrant dans le bilan énergétique de l'absorbeur

3.2.1 Bilan thermique de l'absorbeur

L'absorbeur est porté à la température T qui est exposée aux rayons solaires.

La puissance incidente du soleil est noté E_s et on suppose que la température de la plaque 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 :

$$\epsilon\sigma T^4 + P_C + \varphi_u = \alpha E_s + \alpha' \sigma T_{en}^4 \quad (12)$$

Où $\sigma = 5,6697.10^{-8} \text{ W m}^{-2} .\text{K}^{-4}$, c'est la constante de Stefan –Boltzmann
 P_c sont les pertes par convection et T_{en} est la température d'environnement.
 T est dite température de stagnation, c'est la température maximale que l'on peut obtenir par une plaque exposée au soleil qui correspondant à l'équilibre thermodynamique.

Alors l'absorbeur va rayonne 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 :

$$T_{en} = T_a - 6^\circ\text{C} \quad (13)$$

T_a Est la température ambiante

En prendra fréquemment

$$T_{en} \approx T_a$$

3.2.2 Le rendement radiatif

On définit le rendement thermique de la surface absorbante par :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{E_s} \quad (14)$$

soit

$$\eta = \frac{\alpha' \sigma T_a^4 - \varepsilon \sigma T^4 - P_c}{E_s} + \alpha \quad (15)$$

Si on néglige les pertes d'énergie par convection et conduction on aura que l'énergie rayonnée ; alors le rendement sera, dans ce cas, appelé rendement radiatif. Il sera écrit de la manière suivante :

$$\eta_R = \alpha \left[1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{(T^4 - T_a^4)}{E_s} \right] + (\alpha' - \varepsilon) \frac{\sigma T_a^4}{E_s} \quad (16)$$

Ou on peut négliger le dernier terme du deuxième membre et en remplaçant Ten par Ta puisque on peut utiliser l'évidence des deux relations ci-dessous :

$$\varepsilon (T^4 - T_a^4) \gg (\alpha' - \varepsilon) T_a^4$$

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

Avec cette approximation on obtient le rendement sous la forme suivante :

$$\eta_R = \alpha \left(1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{(T^4 - T_a^4)}{E_s} \right) \quad (17)$$

L'analyse de l'équation (16) révèle de nombreuses remarques importantes sur l'influence des différents paramètres thermiques et optiques sur ce rendement. En effet, pour augmenter ce rendement on doit accroître le rapport α/ε on dit qu'on a affaire à la sélectivité, ou par l'augmentation de l'énergie incidente on dit qu'on s'intéresse alors à la concentration X en plaçant un réflecteur dont la surface S_r très grande par rapport à celle de l'absorbeur S_a figure18.

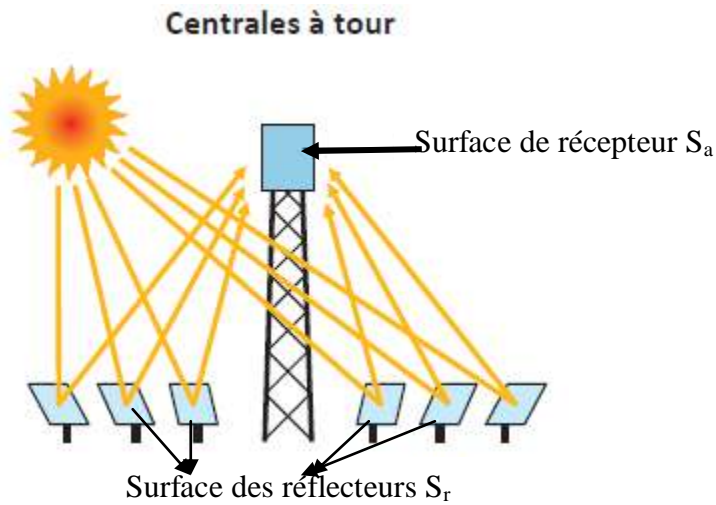


Fig.18 : Centrale à tour

L'intensité de la concentration du rayonnement solaire se quantifie par le facteur de concentration X . Plus ce facteur est élevé plus la température atteinte sera importante.

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur une notion géométrique. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture du réflecteur à la surface du récepteur par, [12]:

$$X = \frac{S_r}{s_a}$$

Où

S_r est la surface de réflecteur

s_a la surface de l'absorbeur.

Alors le rendement radiatif devient

$$\eta_R = \alpha \left(1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{(T^4 - T_a^4)}{XE_s} \right) \quad (18)$$

3.3 Modélisation de la surface de l'absorbeur

L'alternative de L'emploi des surfaces sélectives absorbantes peuvent apporter une augmentation notable du rendement radiatif des capteurs plans ou à concentration. De telles surfaces ont un coefficient d'absorption voisin de

l'unité dans le spectre solaire et un coefficient d'émissivité proche de zéro dans l'infrarouge fig.19-c. On rappelle que cette combinaison de propriétés est possible à réaliser grâce à la faible superposition des gammes de longueurs d'ondes du spectre solaire et des radiations émises par la surfaces de l'absorbeur à la température T, fig.19-a..La concentration du rayonnement peut, elle aussi, favoriser une amélioration du rendement de l'absorbeur. Sous cette base, notre étude se focalisera sur le rôle de la sélectivité et de la concentration sur le fonctionnement optimal d'un convertisseur héliothermique Arconada et al, (1980) ; Aouachria, (1984) ; Strachan, et al, (1993). Dans notre étude, nous avons tenu compte des propriétés thermodynamiques de la surface de l'absorbeur qui doivent être compatibles avec ses propriétés optiques.

Spectre solaire Spectre de surface

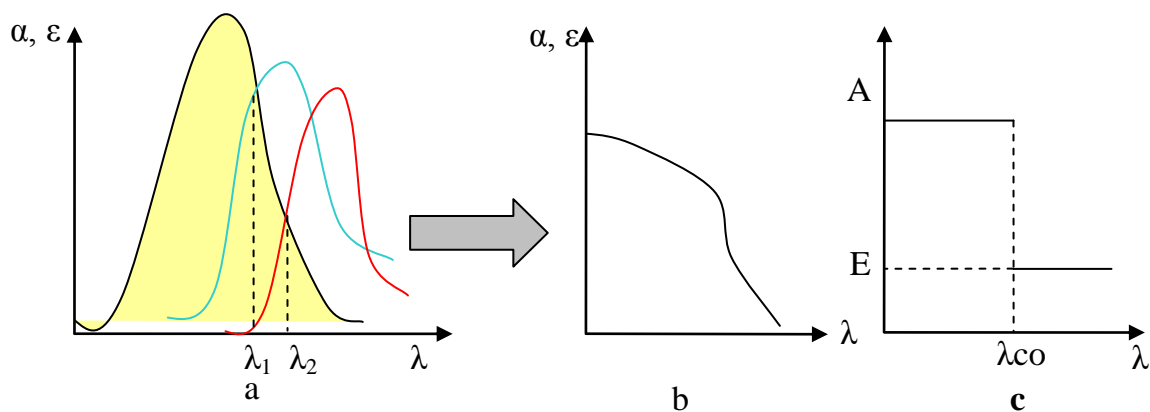


Fig.19 : modélisation d'une surface sélective : a- Spectre solaire, b- propriétés optique réel, c-propriétés optique théorique

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) , fig.19 c.

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

Le soleil sera assimilé à un corps noir à la température T_s donc elle envoie sur la terre, $M_\lambda(T_s)$, appelons l'émitance monochromatique du soleil.

Pour satisfaire les conditions ci-dessus, il faut déterminer le domaine d'absorption et le domaine d'émission concernant la surface de l'absorbeur et cela par une certaine valeur de la longueur d'onde qu'on appelle longueur d'onde de coupure λ_c .

Le soleil sera assimilé à un corps noir rayonnant à la température (T_s), d'après l'équation (6) il envoie sur la terre une quantité d'énergie σT_s^4 appelée l'émitance monochromatique du soleil, $M(\lambda, T_s)$. De là on peut définir la fraction de cette émitance absorbée par la surface de l'absorbeur modélisée sur la fig.19 c, à partir de la relation suivante :

$$\alpha = \frac{1}{\sigma T_s^4} \left[A \int_0^{\lambda_c} M(\lambda, T_s) d\lambda \right] + \frac{1}{\sigma T_s^4} \left[E \int_{\lambda_c}^{\infty} M(\lambda, T_s) d\lambda \right] \quad (19)$$

Soit

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

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

$$\alpha = (A - E) K_s + E \quad (20)$$

Considérons maintenant le spectre de la surface à la température T où l'on déduit de la même façon :

$$\mathcal{E} = (A - E) K + E \quad (21)$$

Où A et E les coefficients d'absorption et d'émission modélisés de la surface de l'absorbeur

Le rapport (α/\mathcal{E}) fait intervenir une propriété optique de la surface dans le rendement radiatif qu'on appelle la sélectivité de la surface absorbante,

$A/E = s$. Elle dépend de la température de la surface et de la longueur de coupure, λ_c

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{\left(\frac{A}{E} - 1\right)K_S + 1}{\left(\frac{A}{E} - 1\right)K + 1} \quad (22)$$

Où K_S et K sont des fractions d'énergie solaire absorbée et la fraction d'énergie émise par la surface respectivement. Elles sont calculées à l'aide d'un programme fortran appliquant la méthode de trapèze. Compte tenu des équations. (20) et (21) ; l'expression du rendement radiatif (18) s'écrit ainsi :

$$\eta_R = (A - E)K_S + E - [(A - E)K + E] \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \quad (23)$$

Ou

$$\eta_R = A \left[\left(1 - \frac{E}{A}\right)K_S + \frac{E}{A} - \left(1 - \frac{E}{A}\right)K \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} - \frac{E}{A} \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \right]$$

Soit

$$\frac{\eta_R}{A} = K_S - K \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} - \frac{1}{s} \left[(K_S - 1) + (1 - K) \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \right] \quad (24)$$

L'équation (24) peut être écrite sous forme compacte suivante

$$\frac{\eta_R}{A} = k_1 - \frac{k_2}{s} \quad \text{Avec} \quad s = \frac{A}{E}$$

Et

$$K_1 = K_S - K \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \quad ; \quad K_2 = \left[(K_S - 1) + (1 - K) \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \right]$$

3.3.1 Caractéristiques de la surface sélective

3.3.1.1 Optimisation de la longueur d'onde de coupure

On sait que, d'après l'étude précédent, $K_S = f(\lambda_c)$ et $K = f(\lambda_c, T)$.

On cherche La valeur de la longueur d'onde optimisée en fonction du facteur de concentration pour différentes valeurs de la température de fonctionnement d'un absorbeur d'un capteur solaire. Cela est obtenue pour un rendement radiatif maximal qui peut être, lui aussi obtenu, par l'annulation de sa dérivée par rapport λ . Alors de l'équation (24) on tire :

$$\left(\frac{\partial \eta_R / A}{\partial \lambda} \right)_{\lambda_c} = 0 \quad (25)$$

Soit

$$\frac{\partial \left(\frac{\eta_R}{A} \right)}{\partial \lambda_c} = \left(1 - \frac{1}{s} \right) \frac{\partial K_S}{\partial \lambda_c} - \left(1 - \frac{1}{s} \right) \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \frac{\partial K}{\partial \lambda_c} = 0$$

Après simplification on obtient

$$\frac{\partial K_S}{\partial \lambda_c} = \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s} \frac{\partial K}{\partial \lambda_c}$$

Alors

$$\frac{\partial K_S / \partial \lambda_c}{\partial K / \partial \lambda_c} = \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{X E_s}$$

De l'équation (19) et (20) on a :

$$K_S = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_S) d\lambda}{\sigma T_S^4} \quad \text{Et} \quad K = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T) d\lambda}{\sigma T^4}$$

Et d'après l'équation (5) on remplace $M_\lambda(T_s)$ par sa valeur on obtient :

$$K_s = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T_s) d\lambda}{\sigma T_s^4} = \frac{1}{\sigma T_s^4} \int_0^{\lambda_c} \frac{c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_s}} - 1} \quad (26)$$

Et d'après l'équation (7) on remplace $M_\lambda(T)$ par sa valeur on obtient :

$$K = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T) d\lambda}{\sigma T^4} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda_c} \frac{c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (27)$$

Alors

$$\left(\frac{\partial K_s}{\partial \lambda_c} \right) = \frac{1}{\sigma T_s^4} \left(\frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_s}} - 1} \right) \quad (28)$$

Et de même

$$\left(\frac{\partial K}{\partial \lambda_c} \right) = \frac{1}{\sigma T^4} \left(\frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \right) \quad (29)$$

Donc le rapport de ces deux dérivées prend la forme

$$\frac{\partial K_s / \partial \lambda_c}{\partial K / \partial \lambda_c} = \frac{T^4}{T_s^4} \left[\frac{e^{\frac{c_2}{\lambda_c T}} - 1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_c T_s}} - 1} \right] = \frac{\sigma}{X E_s} (T^4 - T_a^4) \quad (30)$$

$$\left[\frac{e^{\frac{c_2}{\lambda_c T}} - 1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_c T_s}} - 1} \right] = \left(\frac{\sigma}{X E_s} (T^4 - T_a^4) \left(\frac{T_s}{T} \right)^4 \right)$$

$$e^{c_2/\lambda_c T} = \left[\left(e^{c_2/\lambda_c T_s} - 1 \right) \left(\frac{\sigma}{X E_s} (T^4 - T_a^4) \left(\frac{T_s}{T} \right)^4 \right) \right] + 1$$

Après simplification on obtient

$$\lambda_{cop} = \frac{c_2}{T} \times \frac{1}{\text{Ln} \left[\left(e^{c_2/\lambda_{cop} T_s} - 1 \right) \frac{\sigma}{X E_s} (T^4 - T_a^4) \left(\frac{T_s}{T} \right)^4 + 1 \right]} \quad (31)$$

$$\lambda_{cop} = f(\lambda_{cop})$$

La valeur de la longueur d'onde de coupure optimisée est calculée pour différentes valeurs de T(°K) à partir de l'équation (31) et cela par le moyen utilisant un programme fortran appliquant une méthode qui consiste à transformer l'équation $f(x) = 0$ en une équation équivalente $g(x) = x$ où g est une fonction auxiliaire "bien" choisie. de point fixe.

3.3.1.2 La valeur limite de la température d'absorbeur

Pour une quelconque défaillance, celui-ci peut être vidé de son fluide caloporteur ou subir une quelconque panne. Dans ce cas et sous l'effet des niveaux élevés de l'éclairement solaire, la température de l'absorbeur atteint une valeur très haute que le matériau avec lequel est construit ne peut la supporter. Donc il faut limiter cette valeur pour la sécurité du capteur. Cette étude a pour objectif de déterminer la capacité du capteur à résister à des niveaux élevés de températures présentant une proportionnalité avec les éclairagements solaires correspondants sans présenter de défaillances. Pour atteindre la valeur limite de la température de l'absorbeur il faut que le flux utile s'annule :

$$\varphi_U = 0$$

D'après l'équation (14) $\eta_R = \frac{\varphi_U}{E_s} \Rightarrow \eta_R = 0$

$$\eta_R = \alpha \left(1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \frac{T_l^4 - T_a^4}{X E_S} \right) = 0 \Rightarrow \sigma \frac{T_l^4 - T_a^4}{X E_S} = \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (32)$$

T_l : Température limite de l'absorbeur

D'après le rapport des équations (20) et (21) on obtient :

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{(A-E)K_s + E}{(A-E)K + E} \quad (33)$$

Pour un corps idéal, il faut que le coefficient d'absorption (A) tende vers 1 et le coefficient d'émission (E) tend vers 0.

Donc la relation (33) devient sous la forme :

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{K_s}{K}$$

D'après les équations (26) et (27) on obtient $\frac{\alpha}{\varepsilon}$ sous la forme :

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{K_s}{K} = \frac{T_l^4 \int_0^{\lambda_c} M(\lambda, T_s) d\lambda}{T_s^4 \int_0^{\lambda_c} M(\lambda, T) d\lambda}$$

Avec

$$K = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda_c} \frac{c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

Bien que la formule de Planck ci-dessous soit facilement programmable, des formes dérivées (ou approximations) peuvent être utilisées, telle que la longueur d'onde de coupure, pour simplifier certaines formulations. En effet d'après l'optimisation de la longueur d'onde de coupure effectuée la diminution de celle-ci exige l'augmentation de la température fig. [25] l'on arrive à la forme suivante [22], [23] et [24]:

$e^{c_2/\lambda T}$ est grand devant 1

D'où

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

Le rapport d'intégrale devient :

$$\frac{K_S}{K} = \frac{T_l^4 \int_0^{\lambda_c} M(\lambda, T_S) d\lambda}{T_S^4 \int_0^{\lambda_c} M(\lambda, T_l) d\lambda} = \left(\frac{T_l}{T_S}\right)^4 \times \frac{\int_0^{\lambda_c} e^{c_2/\lambda T_l} d\lambda}{\int_0^{\lambda_c} e^{c_2/\lambda T_S} d\lambda}$$

Après les calculs on obtient

$$\frac{K_S}{K} = \left(\frac{T_l}{T_S}\right)^3 \times e^{\left[\frac{c_2}{\lambda_c T_l} - \frac{c_2}{\lambda_c T_S}\right]} = \left(\frac{T_l}{T_S}\right)^3 \times e^{\frac{c_2}{\lambda_c} \left[\frac{T_S - T_l}{T_l \times T_S}\right]}$$

Et d'après l'équation (32) en remplace $\frac{\alpha}{\varepsilon}$ par sa valeur on obtient :

$$\text{Ln} \left(\frac{\sigma (T_l^4 - T_a^4)}{X E_s} \right) = \frac{C_2}{\lambda_c} \left(\frac{T_S - T_l}{T_l T_S} \right) \times 3 \text{Ln} \left(\frac{T_l}{T_S} \right)$$

$$T_l = \frac{T_S - T_l}{T_S} \times \frac{C_2}{\lambda_c} \times \text{Ln} \left(\frac{X E_s}{\sigma (T_l^4 - T_a^4)} \right) \times 3 \text{Ln} \left(\frac{T_l}{T_S} \right)$$

(34)

La valeur de la température limite, en fonction de la longueur d'onde de coupure pour différentes valeurs de températures de fonctionnements, est calculée à partir de l'équation (34) à l'aide d'un programme fortran appliquant la méthode de point fixe.

3.4 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, se basent sur deux méthodes celle des point fixe et trapèze.

3.4.1 Rappel théorique

a. Méthode de point fixe

Principe

Le principe de cette méthode consiste à transformer l'équation $f(x) = 0$ en une équation équivalente $g(x) = x$ où g est une fonction auxiliaire "bien" choisie. Le point α est alors un point fixe de g . Approcher les zéros de f revient à approcher les points fixes de g .

Le choix de la fonction g est motivé par les exigences du théorème de point fixe. En effet, elle doit être contractante dans un voisinage I de α , ce qui revient à vérifier que $|g'(x)| < 1$ sur ce voisinage. Dans ce cas, on construit

Une suite $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ définie par :

- x_0 dans un voisinage I de α
- $\forall n \geq 0, x_{n+1} = g(x_n)$

Théorème

Soient n fixé et u_n trouvé. Pour le schéma d'Euler rétrograde il faut résoudre

Une équation du type

$$u_{n+1} = \Phi(u_{n+1}), \text{ où } \Phi(x) = u_n + hf(t_{n+1}, x).$$

En générale on a donc le problème suivant : Soit $\Phi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$; on veut trouver

α dans $[a, b]$ tel que :

$$\Phi(\alpha) = \alpha.$$

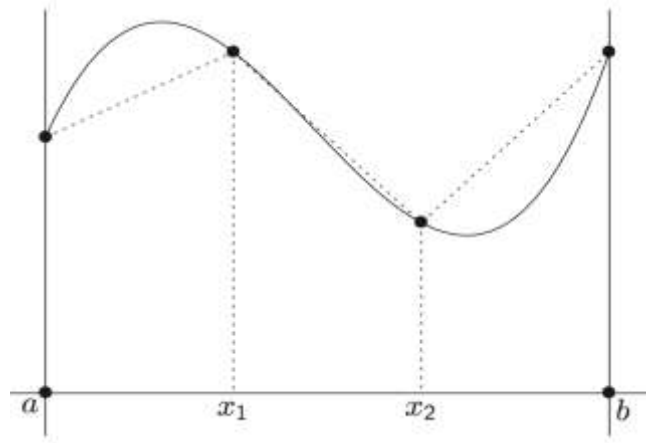
Le point α est dit alors *point fixe* de la fonction Φ .

Idée : On va construire des suites qui vérifient $x^{(k+1)} = \Phi(x^{(k)})$, $k \geq 0$. En effet, si $x^{(k)} \rightarrow \alpha$ et si Φ est continue dans $[a, b]$, alors la limite α satisfait

$$\Phi(\alpha) = \alpha.$$

b. Intégration par la méthode des trapèzes

Principe



Méthode des trapèzes

On remplace la courbe représentative de f , sur chaque segment de la subdivision, par le segment qui joint $(x_i, f(x_i))$ à $(x_{i+1}, f(x_{i+1}))$. Ce la revient donc à interpoler la fonction f sur le segment $[x_i, x_{i+1}]$ par le polynôme de Lagrange de degré 1 aux points x_i et x_{i+1} .

La valeur approchée de l'intégrale de f sur l'intervalle I par la méthode des trapèzes est alors donnée par :

$$T_n = \frac{b-a}{n} \left(\frac{f(a)+f(b)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) \right)$$

L'aire du trapèze de base

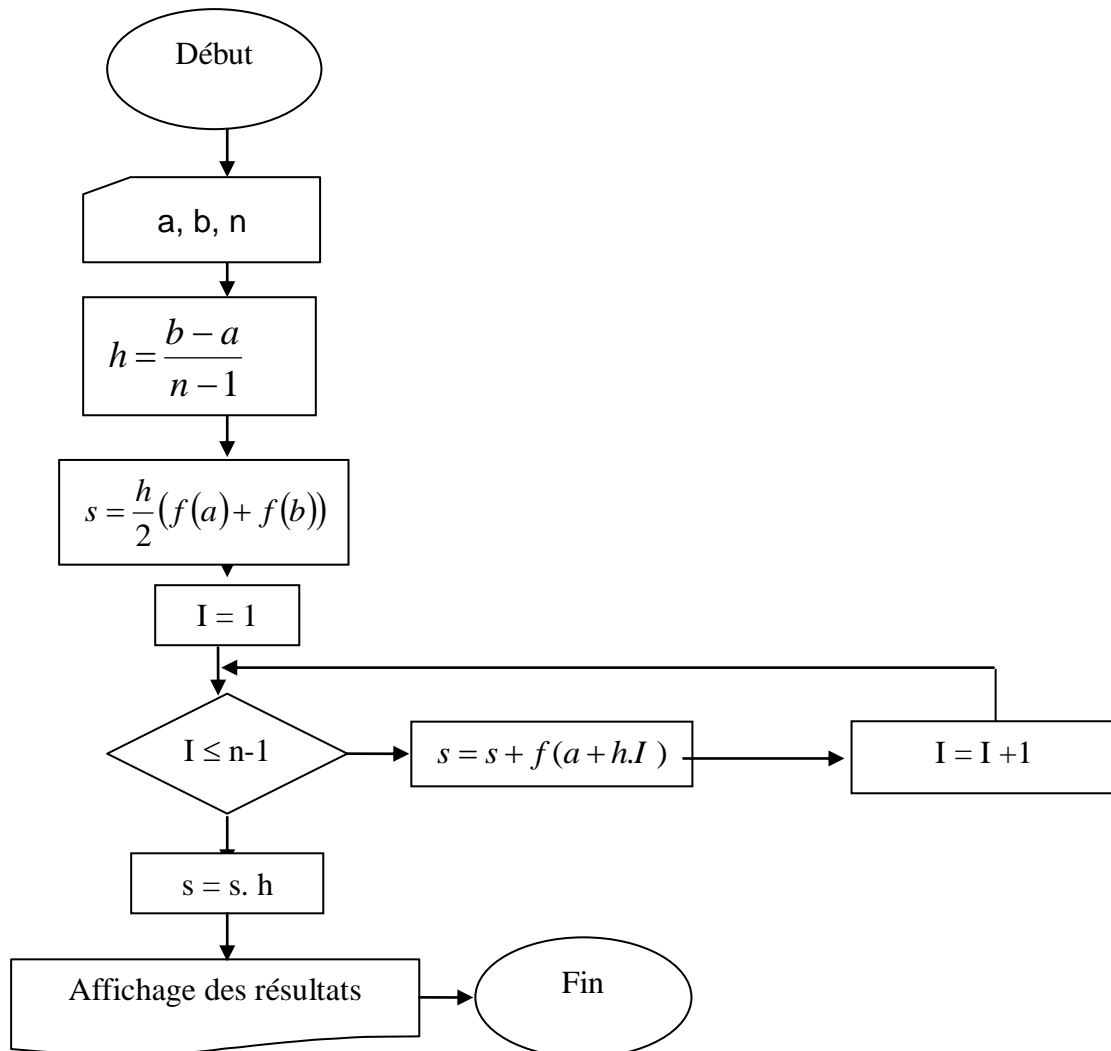
$$[x_i, x_{i+1}] \text{ Est } (x_{i+1} - x_i)(f(x_i) + f(x_{i+1})) / 2 = h(f(x_i) + f(x_{i+1})) / 2.$$

On en déduit que

$$T_n = \sum_{i=0}^{n-1} h(f(x_i) + f(x_{i+1})) / 2 = h \left(\frac{f(a) + f(b)}{2} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i).$$

3.5. ORGANIGRAMME

3.5.1 Organigramme de la méthode des trapèzes



a : représente la valeur inférieure de borne d'intégration.

b : représente la valeur supérieure de borne d'intégration.

n : représente le nombre des points.

h : représente le pas.

I : représente l'indice de la boucle.

f : représente la fonction à intégrer.

Calcul du rendement radiatif

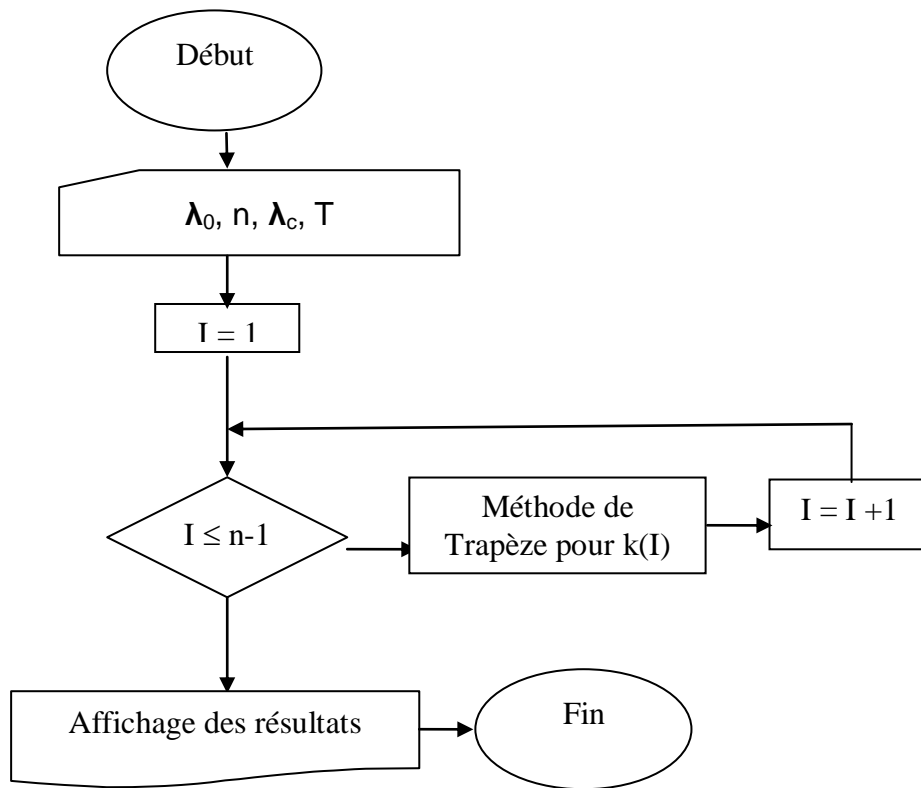
Pour déterminer le rendement radiatif de l'absorbeur, il est nécessaire de connaître les fractions d'énergie solaire absorbée et les fractions d'énergie émise par la surface respectivement k_s et k . Pour cela nous utilisons les formules (26) et (27) et la méthode des trapèzes on obtient :

$$K = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_\lambda(T) d\lambda}{\sigma T^4} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda_c} \frac{c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

Et pour le calcul de rendement radiatif on a utilisé un programme Excel pour la formule (24) :

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

3.4.2 Organigramme de calcul (k_s , k) :



λ_0 : représente la valeur initiale de la longueur d'onde.

λ_c : représente la valeur finale de la longueur d'onde.

n : représente le nombre des points.

T : représente la température de fonctionnement de l'absorbeur.

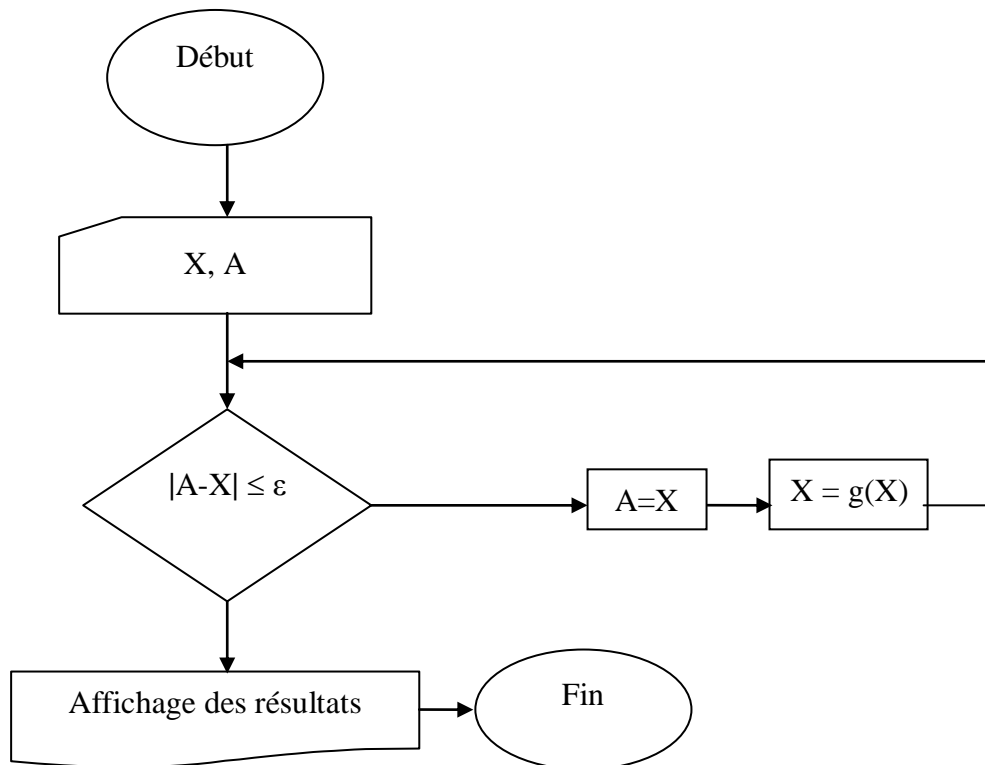
Optimisation de la longueur d'onde de coupure

On cherche La valeur de la longueur d'onde optimisée en fonction du facteur de concentration pour différentes valeurs de la température de fonctionnement d'un absorbeur d'un capteur solaire, pour un rendement radiatif maximal. Ce rendement peut être obtenu par l'équation (31)

$$\lambda_c = \frac{c_2}{T} \times \frac{1}{\ln \left[\left(e^{c_2/\lambda_c T_s} - 1 \right) \frac{\sigma}{X E_s} (T^4 - T_a^4) \left(\frac{T_s}{T} \right)^4 + 1 \right]}$$

de la forme $\lambda_c = f(\lambda_c)$, à l'aide d'un programme élaboré en langage fortran et l'utilisation de la technique du point fixe.

3.4.3 Organigramme de la méthode de point fixe

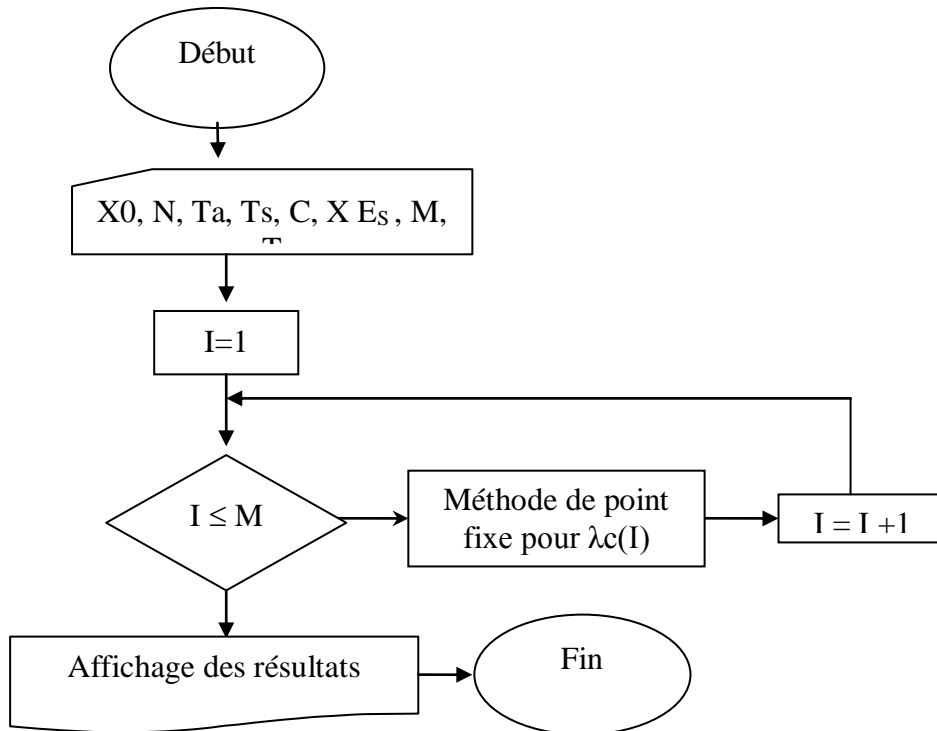


A : présente une case de mémoire.

X : présente la valeur initiale de la solution.

g : présente la fonction.

3.4.4 Organigramme : calcul de $\lambda_{c_{op}}$ en fonction de $X E_S$ pour différentes températures de fonctionnement.



Ta : représente la valeur de la température ambiante.

Ts : représente la valeur de la température de soleil.

X0 : représente la valeur initiale de Lambda.

n : représente le nombre des itérations maximal.

E_S : représente une constante de rayement.

X : représente la concentration solaire.

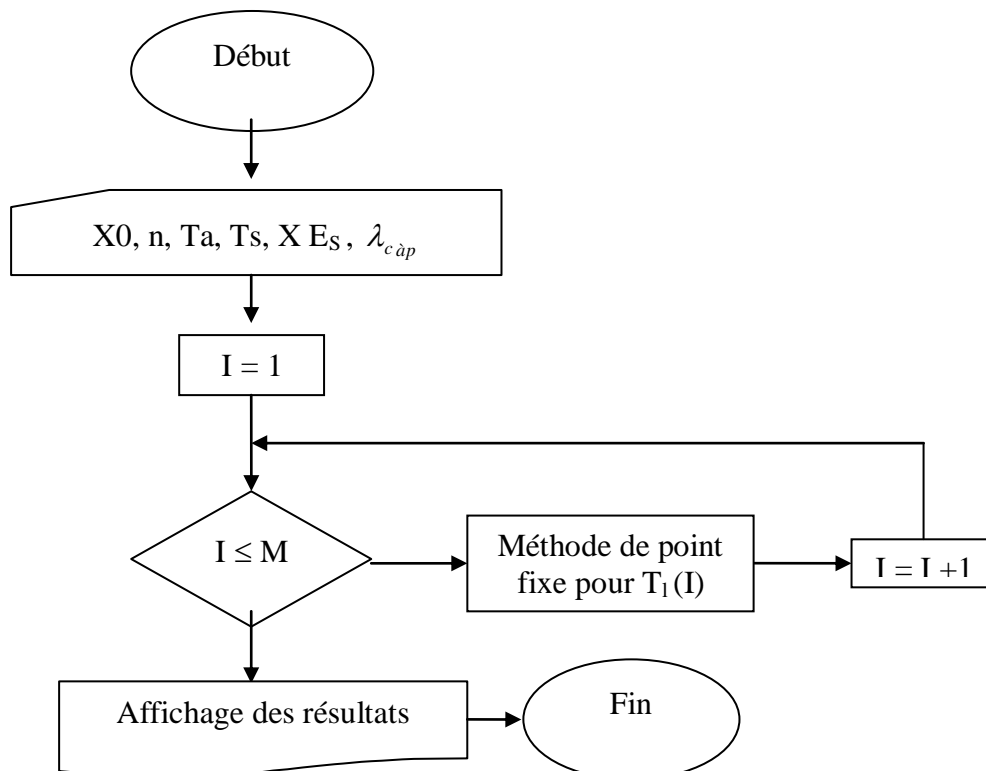
T : représente la température de fonctionnement de l'absorbeur.

Calcul de la température limite en fonction de λ_{cop}

Le calcul de la température limite, en fonction de la longueur d'onde de coupure optimum est calculée à partir de l'équation (33) $T_l = f(T_l)$ à l'aide d'un programme fortran appliquant la méthode de point fixe.

$$T_l = \frac{T_s - T_l}{T_s} \frac{C_2}{\lambda_c} \text{Ln} \left(\frac{X E_s}{\sigma(T_l^4 - T_a^4)} \right) \times 3 \text{Ln} \left(\frac{T_l}{T_s} \right)$$

3.4.4 Organigramme : calcul de la température limite



T_a : représente la valeur de la température ambiante.

T_s : représente la valeur de la température de soleil.

X_0 : représente la valeur initiale de Lambda.

n : représente le nombre des itérations maximal.

E_s : représente la concentration solaire.

X : représente la concentration solaire.

M : représente la taille de tableau T.

λ_{cop} : représente longueur d'onde de coupure optimale

Chapitre 4. Résultats et discussions

Résultats et discussions:

La simulation a été effectuée dans les différentes parties à l'aide de l'EXCEL et d'un logiciel élaboré en langage fortran. Les propriétés physiques employées dans les calculs sont présentées dans le tableau suivant :

Propriétés physiques	Unités
$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$	[W/m ² K ⁴]
$E_s = 100$	[W/m ²]
$C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16}$	[W.m ⁻²]
$C_2 = 1,4385 \cdot 10^{-2}$	[m.K]
$T_s = 5800$	K

4.1 La sélectivité idéale (grande)

Si la sélectivité, s, tend vers l'infinie c.-à-d. $(A/E) \rightarrow \infty$ ou l'émissivité $(E) \rightarrow 0$;

le rendement radiatif devient : $\eta_R/A = K_1 = k_S - k \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{XE_s}$

Donc l'analyse peut être effectuée en trois étapes suivantes :

4.1.1 Influence de la température de fonctionnement sur (η_R/A)

Pour T voisine de T_a :

Dans ce cas on aura le dernier terme du 2^{ème} membre de l'équation ci-dessus

peut être négligé, soit $k \sigma \frac{T^4 - T_a^4}{XE_s} = 0$ donc: $\eta_R/A = K_S$. Alors le rapport entre le

rendement radiatif et le facteur d'absorption, A, prend une valeur constante.

Le rendement radiatif prend sa valeur max pour un coefficient d'absorption proche de la valeur 1.

4.1.2 Influence de la température de fonctionnement sur η_R/A

Dans ce cas, l'expression du rendement contient le terme négligé dans le cas précédent. La figure.20 représente les variations du rendement radiatif ; rapporté au coefficient d'absorption A, en fonction de la température de fonctionnement du capteur pour différentes températures d'environnement. On remarque que la vitesse de la chute du rendement est faible pour les basses températures de fonctionnement mais elle est plus accentuée pour les températures qui dépassent 125°C pour les différentes valeurs de températures ambiantes. On conclut que, l'augmentation de la température de fonctionnement dans les hautes gammes de température (>125°C) a un impact défavorable sur le rendement radiatif. Tout ces observations sont assujetties à une haute sélectivité ce qui montre qu'elle n'a influence sur le rendement dans des gammes de hautes températures.

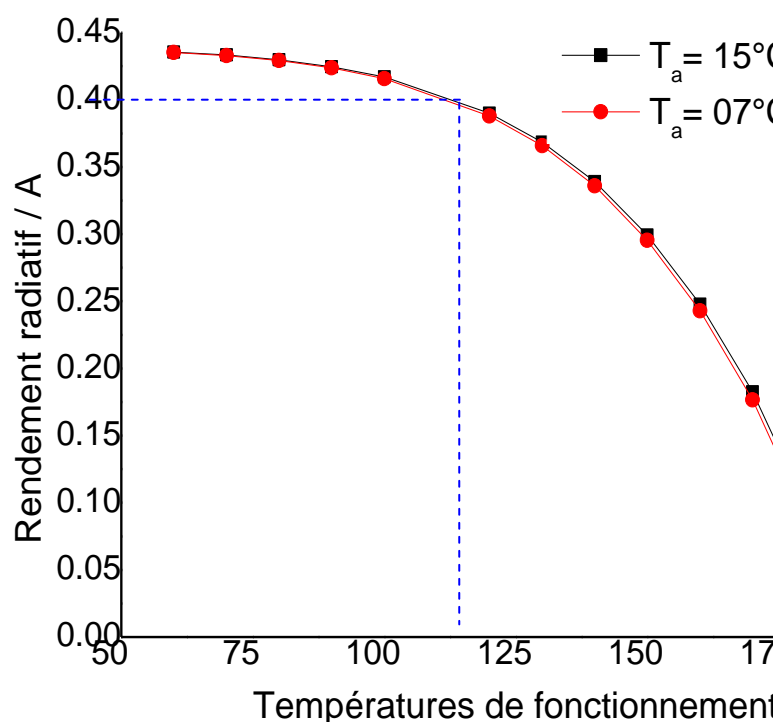


Figure.20 : Rendement radiatif d'un capteur en fonction de la température de fonctionnement

4.1. 3 Influence de la concentration sur η_R/A :

Dans ce cas le rendement radiatif prend la forme suivant

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

La figure 21 représente les variations du rendement radiatif en fonction de la concentration pour trois températures de fonctionnement différentes choisies dans le cas où la température ambiante est égale à 7°C. Ces températures sont choisies dans la gamme de la figure 20 pour mettre en évidence une comparaison bien illustrée. On y remarque qu'il n'y a pas d'influence de concentration du rayonnement solaire sur le rendement radiatif pour une température moyenne (< 60°C) [25] et [26]. Par contre pour les hautes températures de fonctionnement, l'influence est bien sentie dans une plage de la concentration, $X \leq 150$, où la variation du rendement se fait dans le même sens que la variation de la température de fonctionnement. En effet, on a pour une concentration donnée (dans ce cas $X = 25$) et le rendement passe de la valeur 0.37 à la valeur 0.43 quand la température passe de 220° à 180°C ceci représente une variation de 6%

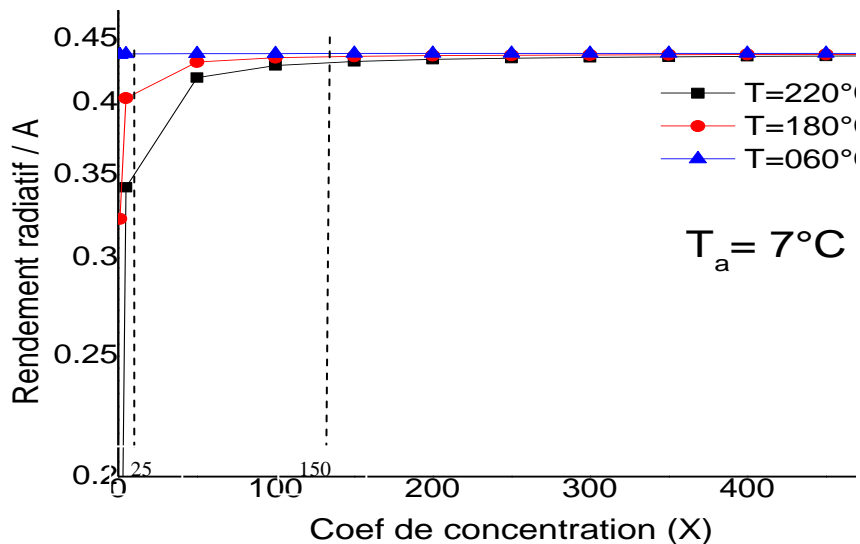


Figure. 21 : Rendement radiatif d'un capteur en fonction du facteur de concentration pour différentes valeurs de T.

4.2 Sélectivité moyenne

✚ L'influence de la sélectivité sur le rendement pour T très proche de T_a :

Dans ce cas le terme contenant la sélectivité ne tend pas vers zéro, d'après l'équation (23) le rendement radiatif prend la forme suivante :

$$\eta_{R/A} = k_s \left(1 - \frac{1}{s} \right) + \frac{1}{s}$$

La figure.22 montre une diminution du rendement avec l'augmentation de la sélectivité ($s = A/E$). Cette diminution brusque et qui atteint sa valeur minimale pour une sélectivité ≥ 200 , où la variation du rendement est voisine de 30%. Par contre que cette influence n'est plus sentie au-delà de la valeur de la sélectivité 200. Ce résultat correspond au cas où la température de fonctionnement est proche de T_a. Il apparait que la sélectivité à un rôle néfaste sur la performance de l'absorbeur dans les zones où la température de fonctionnement est très proche de T_a.

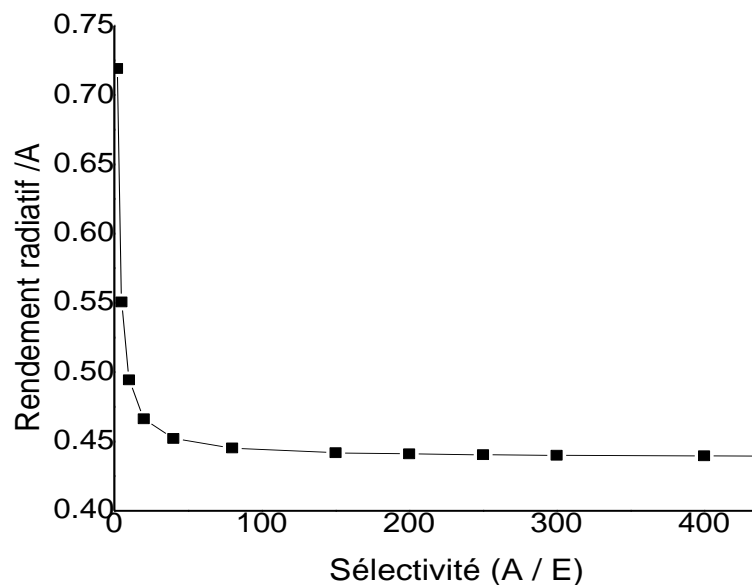


Figure.22 : Rendement radiatif de plusieurs capteurs, en fonction de diverses valeurs de sélectivités

✚ L'influence de la sélectivité sur le rendement pour différentes températures de fonctionnement :

Dans ce cas, les termes contenant la sélectivité, s , et le terme de la température, T , persistent dans l'expression du rendement radiatif qui prend la forme suivante :

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

Maintenant on aura une augmentation de ce rendement pour différentes températures de fonctionnement qui sont non proches de T_a , en fonction de la sélectivité voir figure.23.

Cette augmentation atteint sa valeur maximale pour une température donnée de fonctionnement, et cela pour une valeur de sélectivité bien définie, ainsi :

$$T = 60^\circ\text{C}, (A/E)_{\max} \geq 100, (\eta_R/A)_{\max} = 0.42$$

$$T = 120^\circ\text{C}, (A/E)_{\max} \geq 300, (\eta_R/A)_{\max} = 0.39$$

$$T = 150^\circ\text{C}, (A/E)_{\max} \geq 600, (\eta_R/A)_{\max} = 0.28$$

$$T = 180^\circ\text{C}, (A/E)_{\max} \geq 1000, (\eta_R/A)_{\max} = 0.08$$

On constate que lorsque la sélectivité dépasse la valeur d'environ 200, son influence sur le rendement n'est pas significative. Cependant, lorsque cette température augmente ce rendement chute. Les graphes de la figure 23 mettent bien en évidence l'impact bien prononcé de la sélectivité aux basses gammes de températures de fonctionnement. Donc on en déduit que l'emploi de surfaces sélectives aux hautes températures est inutile.

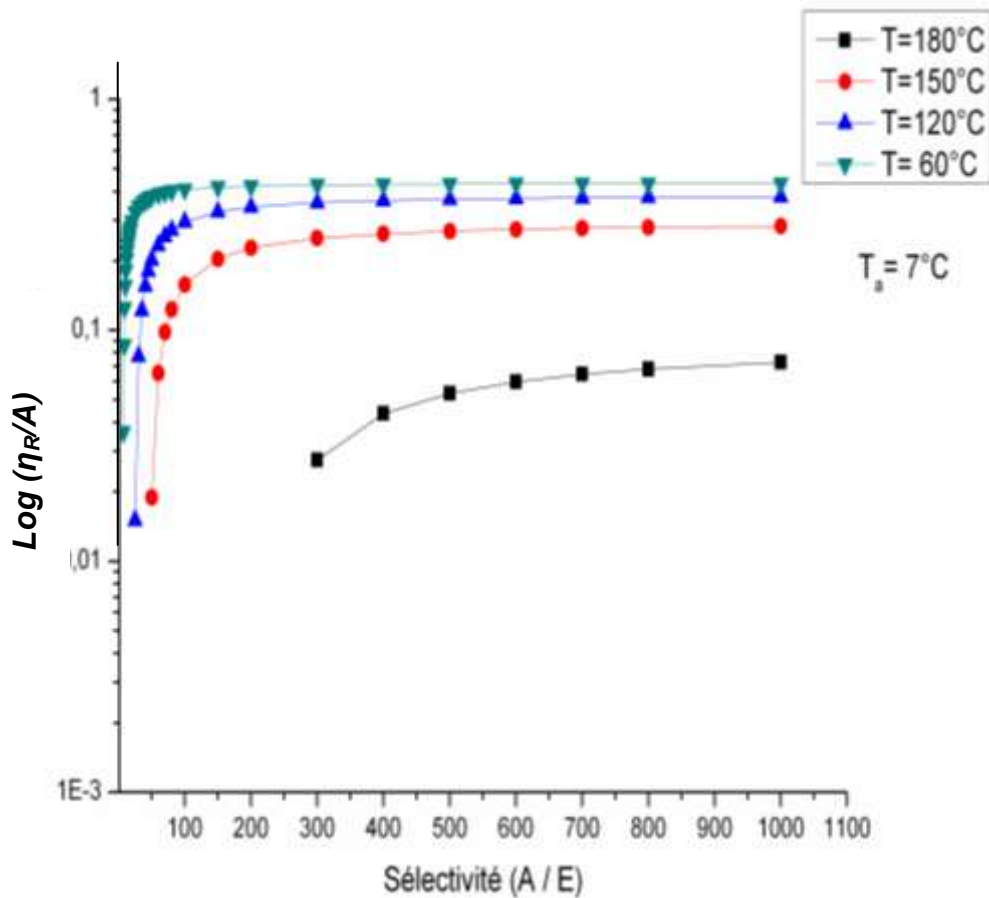


Figure.23 : Rendement radiatif en fonction de diverses valeurs de sélectivités pour différentes valeurs de T

✚ L'influence de la concentration sur le rendement pour différentes valeurs de sélectivité :

Avec la concentration du rayonnement solaire le rendement prend la forme :

$$\frac{\eta_R}{A} = k_S - k\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{XE_s} - \frac{1}{s} \left[(k_s - 1) + (1 - k)\sigma \frac{T^4 - T_a^4}{XE_s} \right]$$

Pour mettre en évidence l'influence de la concentration sur le rendement, à différentes températures de fonctionnement, on a choisi deux cas ($T=60^\circ\text{C}$ moyenne température, et $T=180^\circ\text{C}$ haut température), et deux valeurs de sélectivité pour chaque température où le rendement est maximal et est minimal. On trace alors sur la figure.24 et figure.25 l'évolution du rendement radiatif pour ces deux cas.

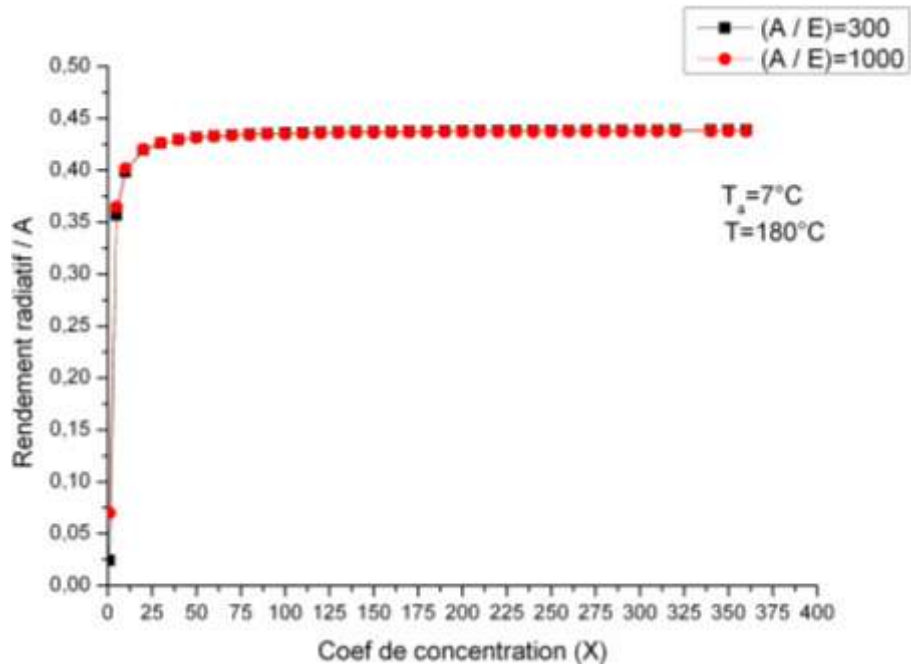


Figure.24 : Rendement radiatif en fonction de la concentration pour différentes sélectivité (s)

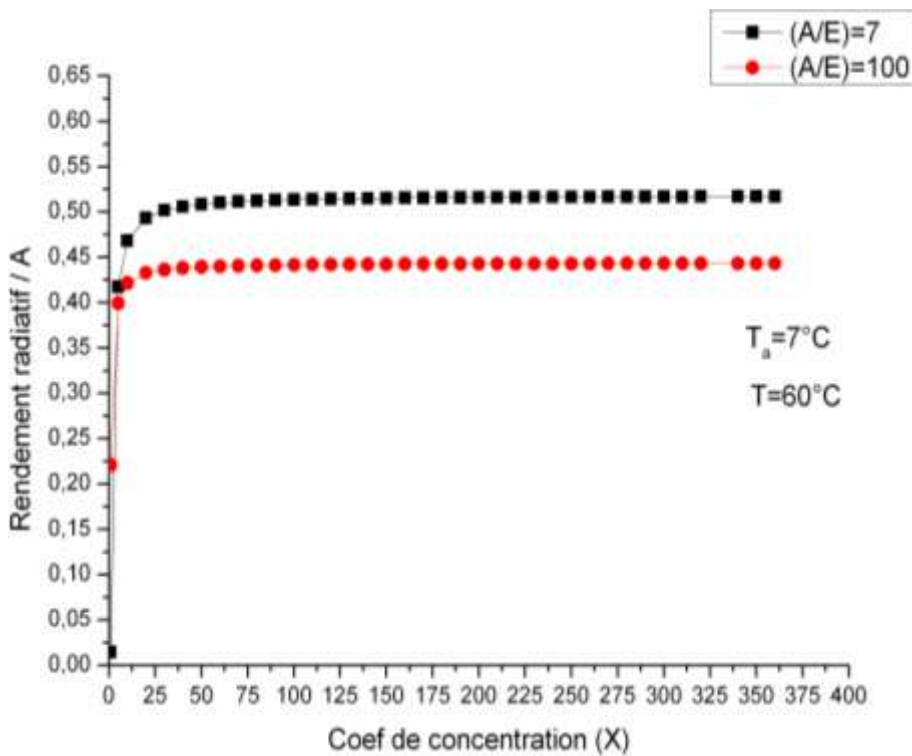


Figure.25 : Rendement radiatif en fonction de la concentration pour différentes sélectivité (s)

On constate que l'influence du coefficient de concentration, sur le rendement, n'est pas significative pour des concentrations supérieures à 50 alors son effet est important pour les valeurs du coefficient < 50 .

Dans le cas de la température moyenne, fig.25, ce rendement augmente, si la valeur de la sélectivité prend des valeurs faibles quand le coefficient de concentration croît dans l'intervalle de $[0 ; 50]$. Avec les mêmes conditions, la sélectivité apporte une contribution favorable sur le rendement et cela pour de faibles valeurs de celle-ci.

D'une manière générale on peut dire que, l'augmentation de la sélectivité n'a pas d'importance pour des hautes températures de fonctionnement associées aux hautes concentrations. L'idée essentielle qu'on peut tirer de cette étude est qu'il y a des domaines de fonctionnement optimal d'un capteur héliothermique où soit on n'utilise pas ni la concentration ni la sélectivité ou bien on les utilise deux à la fois.

4.3 Optimisation de la longueur d'onde de coupure :

Dans ce cas la longueur d'onde de coupure optimale prend la forme (31) suivant :

$$\lambda_{C_{op}} = \frac{c_2}{T} \times \frac{1}{\ln \left[\left(e^{c_2/\lambda_{C_{op}} T_s} - 1 \right) \frac{\sigma}{X E_s} (T^4 - T_a^4) \left(\frac{T_s}{T} \right)^4 + 1 \right]}$$

La fig. (26 et 27), correspond à la zone froide (7°) et chaude (40°) montrent que les résultats sont totalement identiques. Nous observons aussi que $\lambda_{C_{op}}$ croît avec l'augmentation de la concentration mais elle décroît avec l'augmentation de la température de fonctionnement. L'absorption est maximale lorsque la longueur d'onde de coupure optimale $< 2.5 \mu\text{m}$.

Alors c'est pourquoi l'étude de l'influence de la sélectivité est utile pour les températures de fonctionnement $T \leq 120 \text{ °C}$, $\lambda_c \geq 2.5$.

✚ Zones ($T_a=7^\circ\text{C}$; $T_a=40^\circ\text{C}$), figure.25

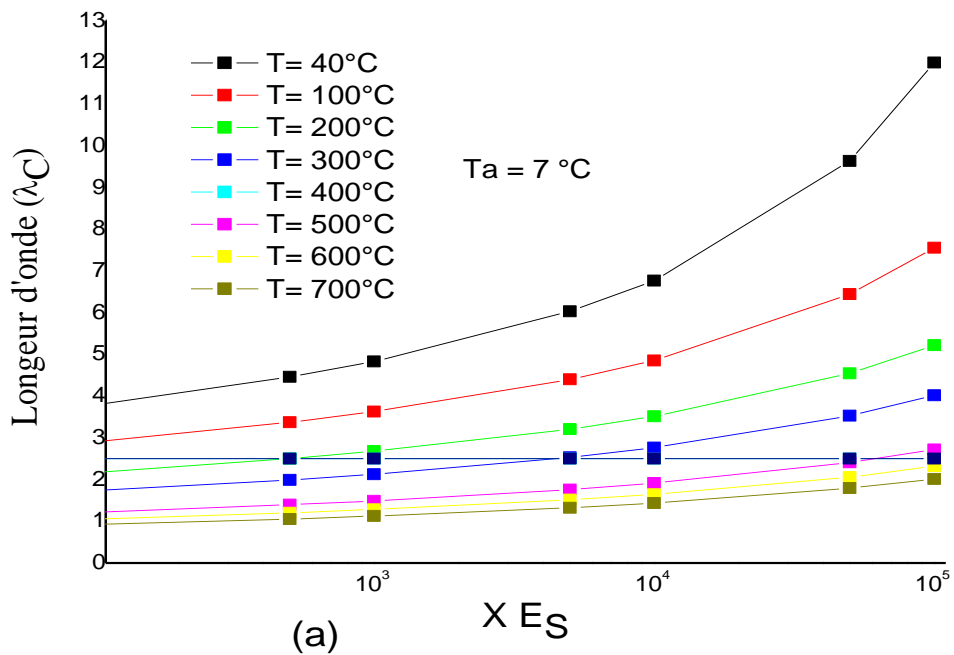


Figure.26 :L'influence de la concentration solaire en fonction de la longueur d'onde de coupure ($\lambda_{c_{op}}$) pour déférentes températures de fonction

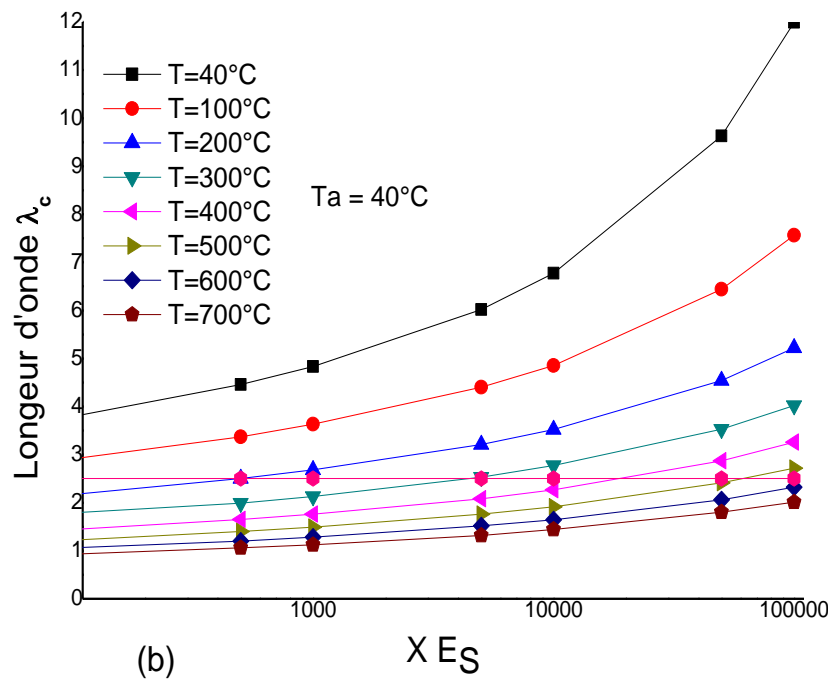


Figure.27 :L'influence de la concentration solaire en fonction de la longueur d'onde de coupure ($\lambda_{c_{op}}$) pour déférentes températures de fonction

.4.3.1 Etude de la sélectivité en fonction des températures de fonctionnement moyennes pour différentes zones :

Dans ce cas l'expression du rendement radiatif qui prend la forme suivante :

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

Pour des températures proches à la température ambiante, l'influence de la sélectivité sur la variation du rendement radiatif est inversement proportionnelle à la sélectivité (défavorable) figure(28) et figure(29). Mais ce rendement augmente rapidement pour les températures moyennes de fonctionnement. Donc on peut dire que l'influence de la sélectivité sur la variation de rendement radiatif, pour ($60\text{ °C} \leq T \leq 120\text{ °C}$) est significative dans des intervalles de sélectivité bien déterminés, selon la température ambiante. Il est important de noter que l'effet de diminution du rendement diminue avec la diminution de la température ambiante. Cet effet peut devenir favorable lorsque la température ambiante descend au-dessous d'environ 25°C .

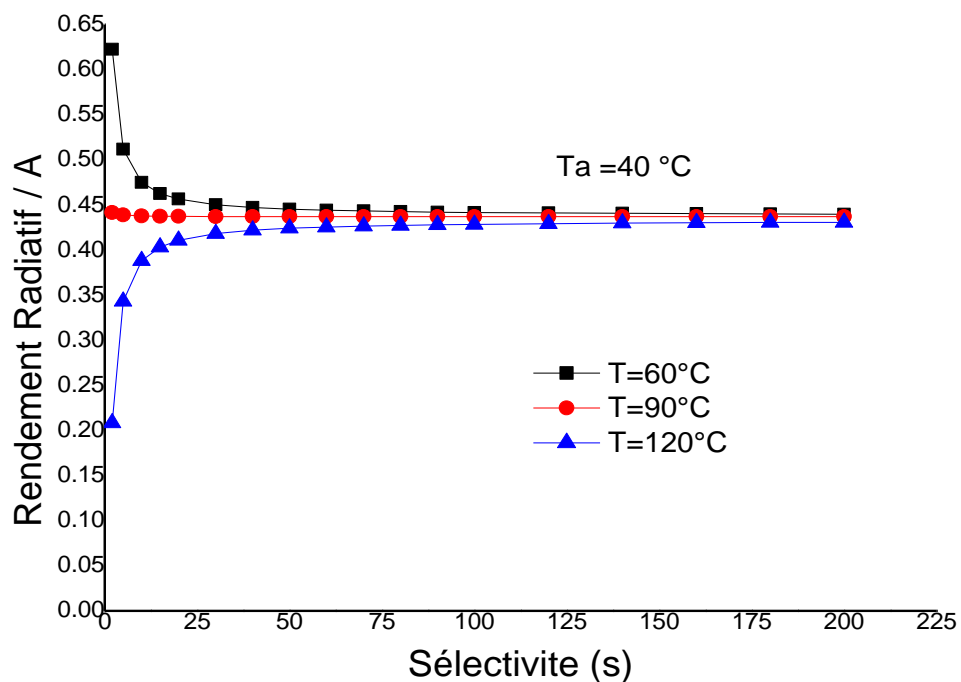


Figure.28 : La variation de η_R/A en fonction de (s)

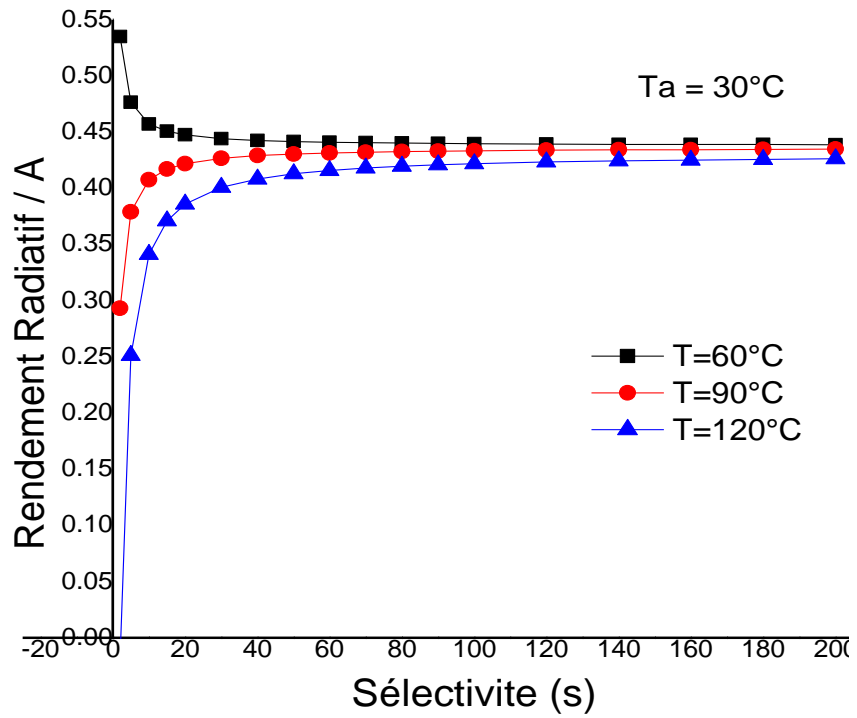


Figure.29 : La variation de η_k/A en fonction de (s)

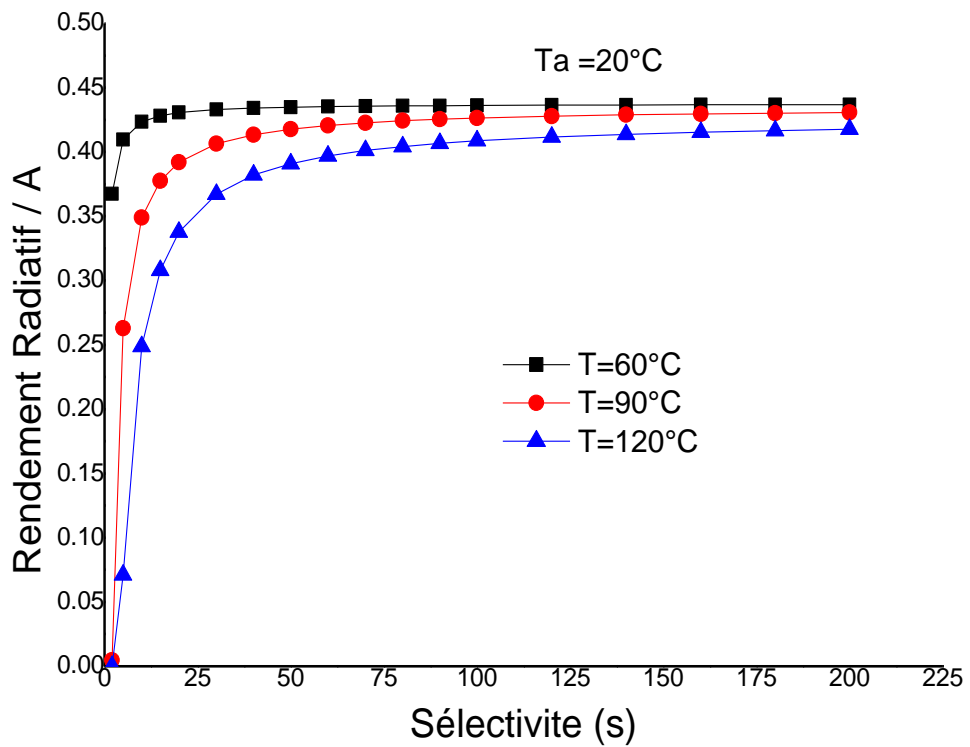


Figure.30 : La variation de η_k/A en fonction de (s)

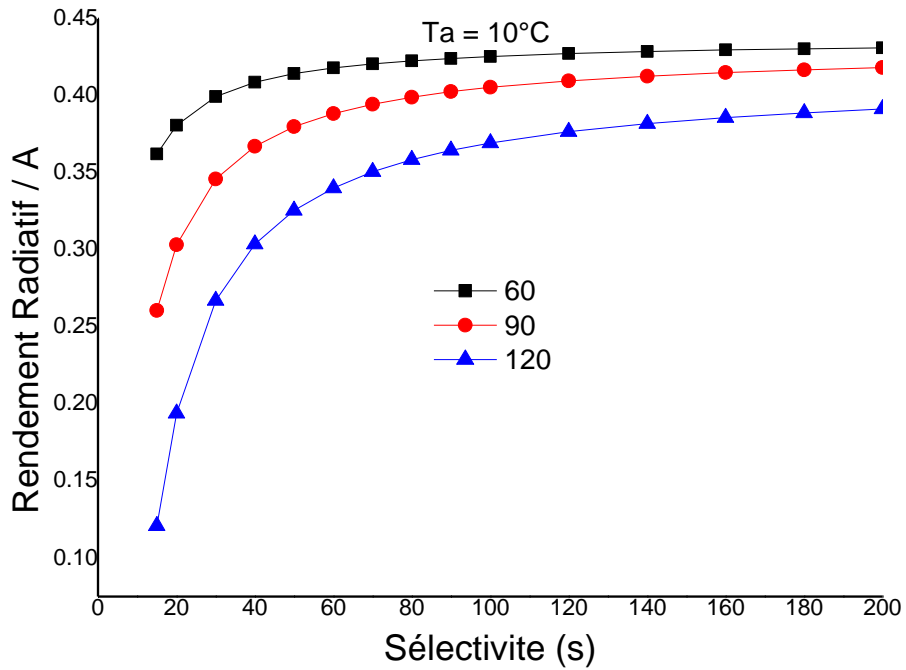


Figure.31 : La variation de $\eta_{R/A}$ en fonction de (s)

L'analyse des fig.28, 29,30 et 31, nous a aidés de déterminer la valeur de la sélectivité de chaque absorbeur pour différentes zones qui sont représentées dans le tableau (1).

T	T _a	Sélectivité pour $(\eta_{R/A})_{max}$			
		40°C	30°C	20°C	10°C
60°C		défavorable	défavorable	20	40
90°C		défavorable	30	50	120
120°C		25	50	90	180

Tableau(1) : valeurs de sélectivité en fonction de T pour différentes zones

4.4 Détermination de la température limite

La valeur limite de la température de la surface de l'absorbeur, en fonction de la longueur d'onde de coupure, est calculée à partir de l'équation (34) :

$$T_l = \frac{T_s - T_l}{T_s} \times \frac{C_2}{\lambda_c} \times \text{Ln} \left(\frac{X E_s}{\sigma(T_l^4 - T_a^4)} \right) \times 3 \text{Ln} \left(\frac{T_l}{T_s} \right)$$

Les figures 32 et 33 montrent la variation de la température limite de l'absorbeur et de 33° pour les températures ambiantes de 7°C et de 40°. Si je considère une autre température de fonctionnement T = 300° C, fig. 30 et 31, déterminant une longueur d'onde de coupure revient à choisir une autre substance de la surface de l'absorbeur. Dans ce cas on observe les mêmes remarques.

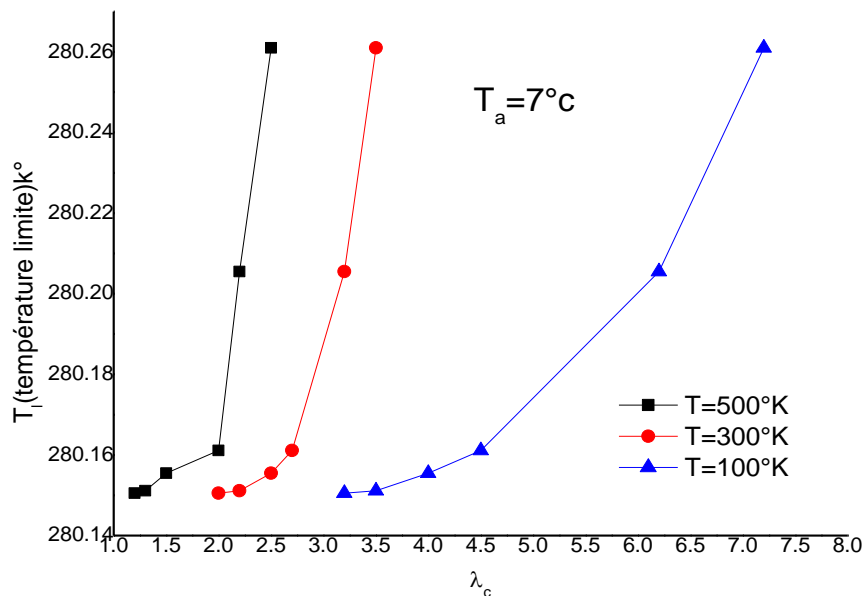


Figure.32 : La variation de la Température limite en fonction de (λ_c) dans une zone froide

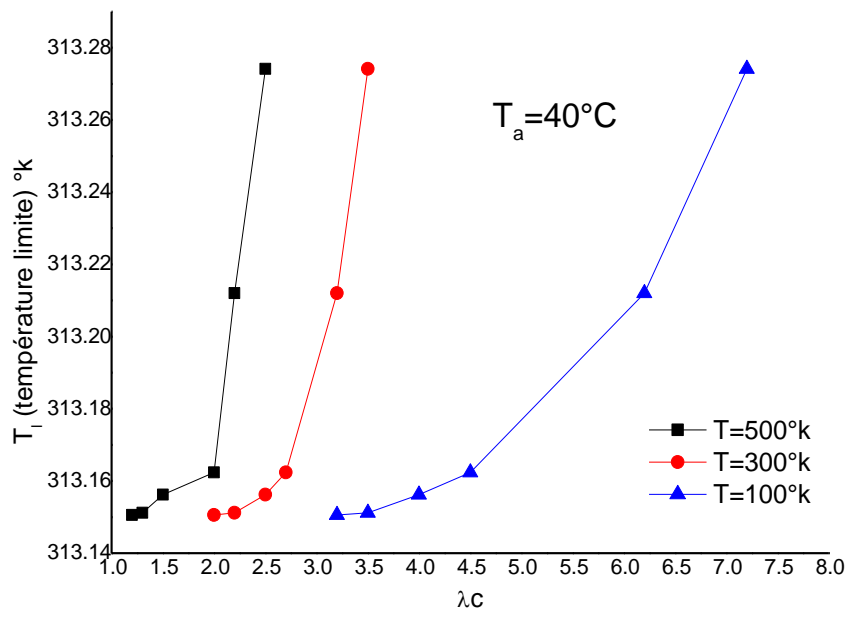


Figure.33 : La variation de la Température limite en fonction de (λ_c) dans une zone chaude

Conclusions

Cette étude a bien mis en évidence l'influence de chacun de ces paramètres sur la performance énergétique du capteur. Elle nous a permis d'estimer et de déterminer trois gammes de température de fonctionnement du capteur en indiquant l'emploi seule, de sélectivité, de la concentration ou les deux simultanément. Le rendement en fonction de la sélectivité, de la température de fonctionnement ainsi que le coefficient de concentration a été déterminé.

Suit a ce travail on a bien mis en évidence l'optimisation de la longueur d'onde pour une valeur optimisée en fonction du facteur de concentration pour différentes valeurs de T, pour un rendement radiatif optimale pour différentes zones.

En fin on a déterminé la température limite en fonction de longueur d'onde de coupure est ce la juste pour choisir les matériaux convenable pour résister a une telle température.

Références Bibliographiques

- [1] Martin Joly, " Revêtement nanostructure pour absorbeur solaire thermique résistant à la chaleur et à la corrosion " LESO LUNCHTIME LECTURE, EPFL CO 011, 2009.
- [2] Th.Alian, "Le stockage des renouvelables "Mémento de l'hydrogène- Fiche 11 octobre 2011.
- [3] M. WOLF, " Revêtement nanostructure pour absorbeur solaire thermique résistant à la chaleur et à la corrosion " Department of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, Solar Cells, pp. 53-63, 1986.
- [4] H. A. Zondag et al., The yield of different combined PV-thermal collector designs, Solar Energy, Vol. 74, pp 253-269, 2003.
- [5] A.Hegazy, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, Energy Conv. & Management, Vol. 41 (2000).
- [6] Y.B. Assoa et al., Study of a new concept of photovoltaic–thermal hybrid collector, Solar Energy, Vol. 81, pp. 1132-1143, 2007.
- [7] B. Robles-Ocampo et al., Photovoltaic/thermal solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 91, pp.1966-1971, 2007.
- [8] M. Antonio, "Les énergies renouvelables au Maroc" CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables au Maroc),2004.
- [9] J. Spitz et al. (1979)"Matériaux sélectifs pour la conversion photo thermique de l'énergie solaire "Revue De Physique Appliquée Tome 14, Page 67, Janvier 1979.
- [10] G. Gouhman et al, (1980) "Surfaces sélectives : propriétés optiques et estimation de l'efficacité énergétique dans l'application aux récepteurs solaires " Revue Phys. pp.393-396,1980.
- [11] J. Lafait, et al. ,(1980) "Le chrome noir et la sélectivité aux moyennes températures (100-250 °C)" Revue Phys. pp. 403-409,1980.
- [12] A. Khouya et Al, "Contribution à l'étude comparative de trois configurations de capteurs solaires plans à air et à application au séchage du bois" 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [13] F. Menasria et Al, "Modélisation des échanges convectifs dans le conduit utile d'un capteur solaire plan à air muni de rugosités artificielles de formes

- rectangulaires " Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°3, pp.369 – 379,2011.
- [14] S. Oudjedi, (2008) "Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage" Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger pp. 255 – 266,2008.
- [15] P. Oelhafen, A. Schu, " Nanostructure materials for solar energy conversion" Solar Energy 79, pp.110–121, 2005.
- [16] T. Bostrom et al, " solution-chemical derived nickel–alumina coatings for thermal solar absorbers " Solar Energy 74, pp. 497–503, 2003.
- [17] Chao-Ching Chang et al, " Poly (urethane)-based solar absorber coatings containing nanogold " Solar Energy, 2012.
- [18] A.Arconada et F.Papini "Bilan thermique des convertisseurs de l'énergie solaire : rôle de la sélectivité et de la concentration " Revue Phys. Appl. 15 pp. 163-167, 1980.
- [19] Z. Aouachria, cours d'héliophysique II, Magistère de physique énergétique1984.
- [20] "Toiture solaire AS " Revue Energie Solaire. Appl. pp . 22-53, Aout2009.
- [21] Jean-Louis Dufresne "LA détermination de la constante solaire" La Météorologie, n°60, pp. 36-43, fév. 2008.
- [22] I.N.C.A de Lyon "Rayonnement" Dép. Génie Civil et Urbanisme 3CGE.
- [23] Gauvin Laetitia "Radiation Laws and Planck's Constant" January 17, 2005.
- [24] Christophe Rodiet "Mesure de Température par Méthode Multi-Spectrale " Master 2 CE, Univ de la réunion, 15.10.2006.
- [25] R. Pasquetti et Al "Thermal Conversion of Solar Radiation" Solar Energy Vol. 21. pp. 129-138, 1978.
- [26] Soteris A. et Al "Thermal Conversion of Solar Radiation" Progress in Energy and Combustion Science, pp. 231–295, 2004.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

Mon père et ma mère.

A ma femme et mes enfants.

Mes frères et mes soeurs.

Mes collègues d'étude.

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

Kalla Fayçal
Kalla Fayçal

Kalla.faycal@yahoo.com