
CHAPITRE 1 :

**Etude bibliographique sur les matériaux des
dispositifs à effet de serre**

Introduction :

L'utilisation des énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire, est parmi les solutions préconisées pour pallier au manque d'eau dans les endroits déshérités par l'utilisation des dispositifs solaires à effet de serre. Différents modèles ont été conçus en tenant compte des effets de différents paramètres (atmosphériques, de conception et techniques opérationnelles). Une description de ces dispositifs est nécessaire pour pouvoir optimiser les systèmes énergétiques solaires en utilisant les matériaux fonctionnels adéquats. Ensuite, dans un second temps une étude bibliographique sur le comportement en endommagement par vieillissement des polymères est indispensable. Nous commencerons par décrire les caractéristiques physiques et géométriques solaires puis les matériaux fonctionnels dans les dispositifs solaires à effet de serre comportant les matériaux absorbants, les matériaux transparents et les matériaux isolants. On s'intéressera particulièrement aux matériaux polymères thermoplastiques et leur vieillissement thermique et ainsi on terminera par une synthèse bibliographique.

I. Caractéristiques physiques et géométriques Solaires :

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de la terre. Notre planète reçoit 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'exploitation de cette énergie peut se faire soit thermiquement sous forme de chaleur par des capteurs solaires, soit par effet thermodynamique avec des capteurs utilisant des absorbants sélectifs, soit sous une forme photovoltaïque avec des modules constitués de cellules solaires. A titre d'exemple, les ressources annuelles d'énergie solaire en Algérie sont représentées dans la **Figure 1**.

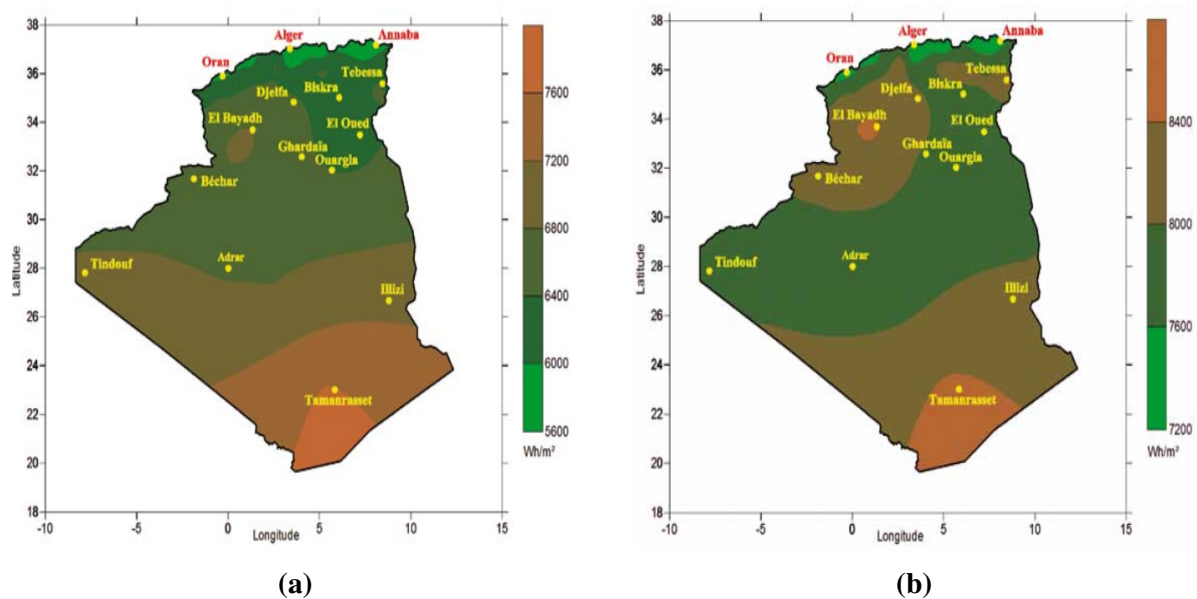


Figure 1 : Carte de la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue en Algérie [1] :
(a) Surface horizontale, cas d'un ciel totalement clair
(b) Surface inclinée à la latitude du lieu, cas d'un ciel totalement clair

1.1 Géométrie et atmosphère :

La Terre est en mouvement de rotation autour du soleil en 365 jours 48 minutes 46 secondes (année tropique) et tourne autour d'elle même en 24 h. La distance moyenne Terre - Soleil est $d = 149$ millions de kilomètres. La trajectoire de la Terre autour du soleil est une ellipse faiblement excentrée. Les distances spécifiques sont :

- Au solstice d'été (21 juin), la Terre est éloigné au maximum : $d_{\max} = 1.017 \times d$
- Au solstice d'hiver (22 décembre), elle est à la distance minimale : $d_{\min} = 0.983 \times d$

L'observateur terrestre placé sur un cercle dont le soleil occuperait le centre verrait celui-ci sous un angle de $32'$ d'arc, soit environ $1/2$ degré. Voir **Figure 2** [2].

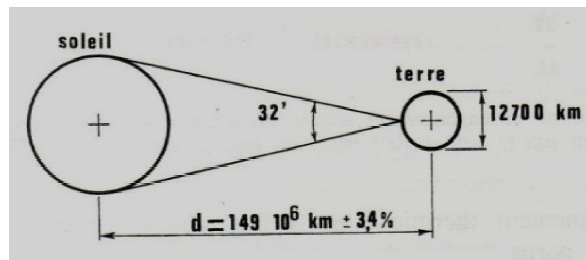


Figure 2 : La distance Terre - Soleil

1.2 Constante solaire I_0 :

La constante solaire, c'est-à-dire le rayonnement direct I_0 reçu par l'unité de surface placée perpendiculairement aux rayons du soleil à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre, est de 1353 W/m^2 d'après des mesures effectuées par satellite. La constante solaire I_0 représente le rayonnement total du spectre solaire qui a la forme représenté en **figure 3** [3].

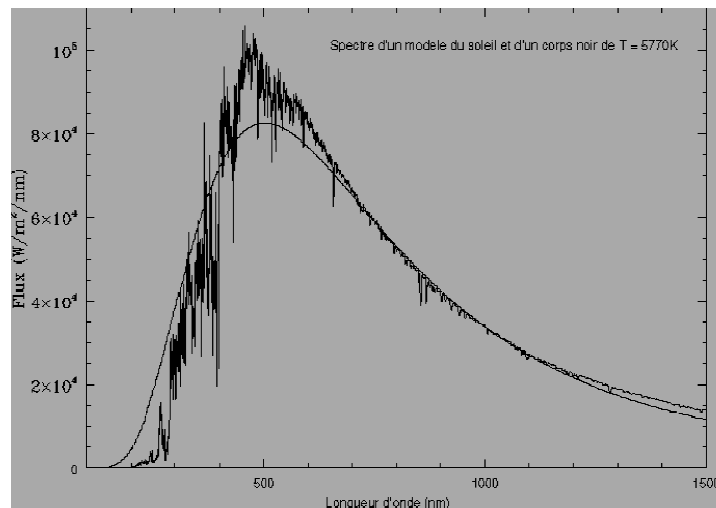


Figure 3 : Spectre du rayonnement solaire, en fonction de la longueur d'onde λ (μm).

Le rayonnement thermique est défini comme l'énergie rayonnante émise par un corps du fait de sa température. L'émission de rayonnement thermique est gouvernée par la température du corps émetteur (soleil 5469°C , corps terrestre 20°C ou plus). L'étendue spectrale est comprise entre $0,1$ et $100 \mu\text{m}$. Le rayonnement solaire émis à 5469°C est compris entre $0,2$ et $5 \mu\text{m}$.

Les angles h et α peuvent être calculés à partir de la latitude de lieu L , de la déclinaison δ et d'angle horaire w .

1.3.4 hauteur (h) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. En peut définir l'angle zénithal noté θ_z qui est l'angle que fait la direction du Soleil avec le vecteur du lieu :

$$\theta = 90^\circ - h \tag{5}$$

1.3.5 Angle d'incidence θ :

C'est l'angle entre le plan du capteur et la radiation solaire θ qui est exprimé par :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos i + \cos \delta \cos i \cos w + \cos \delta \sin i \sin \alpha \sin w \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin i \cos \alpha + \cos \delta \sin \varphi \sin i \cos \alpha \cos w \end{aligned} \tag{6}$$

Où i est l'inclinaison du capteur et α est l'angle entre le méridien local et la projection de la normale au plan.

1.4 Composante du rayonnement solaire :

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3 μm (violet - bleu) à 0,7 μm (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction.

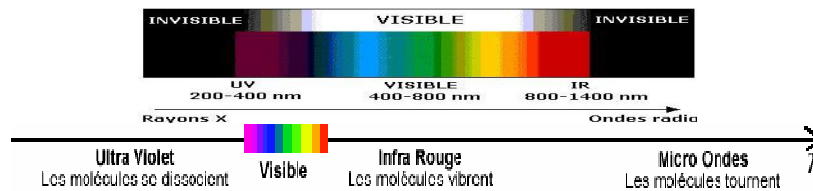


Figure 5 : Répartition du rayonnement solaire [5].

Le rayonnement solaire au sol se divise en plusieurs rayonnements : directs, diffus, réfléchis et globale à partir des conditions physiques à travers l'année.

- *Rayonnement direct* : C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.
- *Rayonnement diffus* : C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère. Pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées.
- *Rayonnement réfléchi* : C'est le rayonnement qui provient du sol causé par la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.

1.5 Conversion par effet thermique :

La terre reçoit une chaleur par le rayonnement solaire à partir d'une distance à travers le vide spatial. Ce transfert intervient dans le mécanisme du rayonnement électromagnétique dans

l'échelle distance terrestre. La matière émet des ondes électromagnétiques sous différente excitation. A distance entre les corps, l'onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence ν ou sa longueur d'onde λ et liées par la relation $C = \lambda\nu$ dans laquelle $C = C_0/n$ avec C la vitesse de propagation, C_0 la vitesse de lumière ($2,99 \cdot 10^8$ m/s) et n le milieu traversé. Le rayonnement thermique est émis par la matière du fait de sa température et la variation de son énergie calorifique. Il occupe une très faible portion du spectre des ondes électromagnétiques. La densité du rayonnement est définie par les paramètres suivants :

- L'angle solide Ω est l'angle formé par le point M et la projection conique dans l'espace.

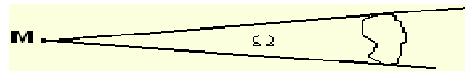


Figure 6 : Angles solides [6]

Cas d'une surface infinie : Soit angle solide $d\Omega$ aux points M assemble basse sur une surface élémentaire ds entourait par un point P, L la distance MP donc en évolue $d\Omega$ on sphère de centre M et de rayon L , et on a $d\sigma$ élément de surface sur sphère.

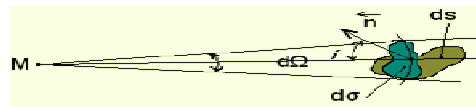


Figure 7 : Angles solides élémentaires [6]

Donc
$$d\Omega = \frac{d\sigma}{L^2} \quad (7)$$

Avec
$$d\sigma = ds \cdot \cos i$$

Cas d'une surface plane finie :
$$\Omega = \iint_s \frac{ds \cdot \cos i}{L^2} \quad (8)$$

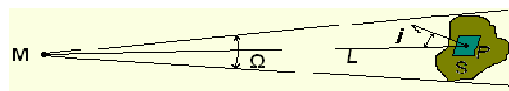


Figure 8 : Angles solides finis [6]

- Intensité énergétique : On considère une direction OX issue de la surface d'un corps radiant par angle θ avec la normale n et azimuth φ . Si $d\Phi_{0x}$ est la portion du flux rayonné dans un angle solide $d\Omega$ la direction du rayonnement d'intensité I_{0x} (le flux).

$$I_{0x} = \frac{d\phi_{0x}}{d\Omega} \quad (9)$$

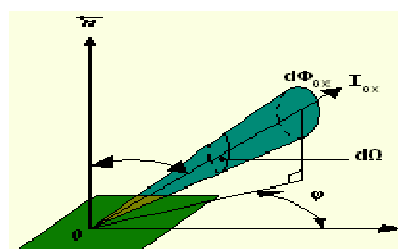


Figure 9 : Définition de l'intensité [6]

- Emittance énergétique : C'est le flux total émis par unité de surface de la source, la puissance $d\Phi$ émis par un élément de surface ds dans l'ensemble de direction :

$$M = \frac{d\phi}{ds} \quad (10)$$

- Luminance :

$$L_{0X} = \frac{I_{0X}}{ds'} = \frac{d^2\phi_{0,x}}{dsd\Omega \cos\theta} \quad (11)$$

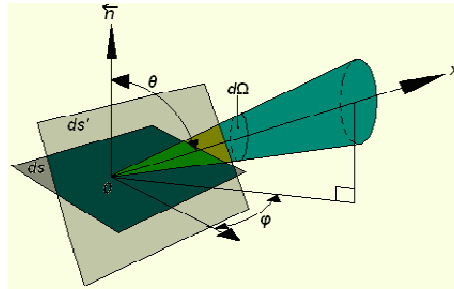


Figure 10 : Définition de la luminance [6]

- Eclairement : C'est l'énergie d'éclairement de surface ds :

$$E = E_0 \cos i \quad (12)$$

Avec $E_0 = \frac{I_{0X}}{r^2}$

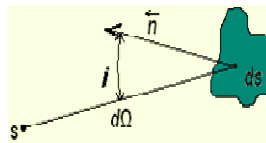


Figure 11 : Eclairement d'une surface [6]

- La transmission est la soustraction du flux incident et la somme des flux réfléchi et absorbé.

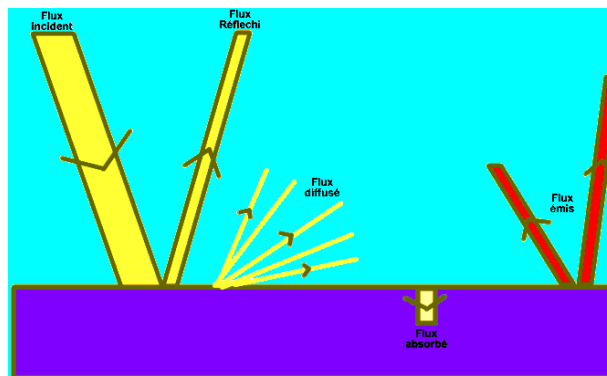


Figure 12 : Composition du flux rayonnant [6]

1.6 Lois de rayonnement thermique :

- Loi de Planck : C'est une expression mathématique théorique établi par Planck qui donne la

valeur de $L_{\lambda T}^0$ en fonction de λ et T [7] :

$$L_{\lambda T}^0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (13)$$

Où $C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3.741 \cdot 10^{-16} \text{ w.m}^2$, $C_2 = h C_0 / K = 0.013388 \text{ m.k}$, h : Constante de Planck égale à $h = 6.6245 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$, K : Constante de Boltzmann égale à $k = 1.38033 \cdot 10^{-23} \text{ J/kg}$ et C_0 : vitesse de lumière donnée par $C_0 = 2.997930 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

La loi de Planck simplifiée est donné par :
$$L_{\lambda T}^0 = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) \quad (14)$$

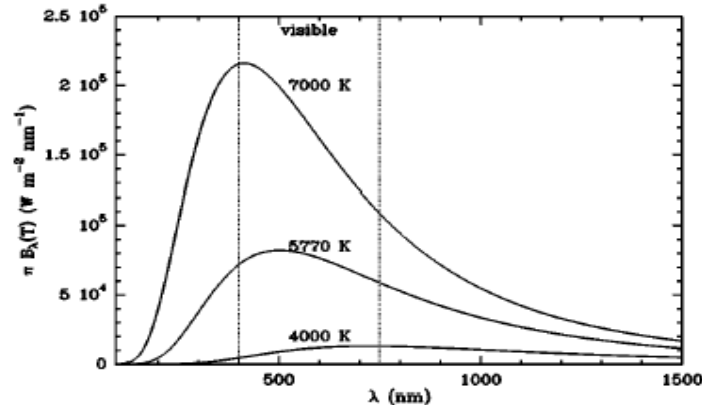


Figure 13 : Distribution spectrale du corps noir en fonction de la température absolue [7]

- Loi de Wien : La première loi de Wien est une loi du déplacement de λ_m en fonction de T et permet de calculer la luminance spectrale d'un corps noir de température T et de longueur d'onde λ_m . Elle est donnée par :

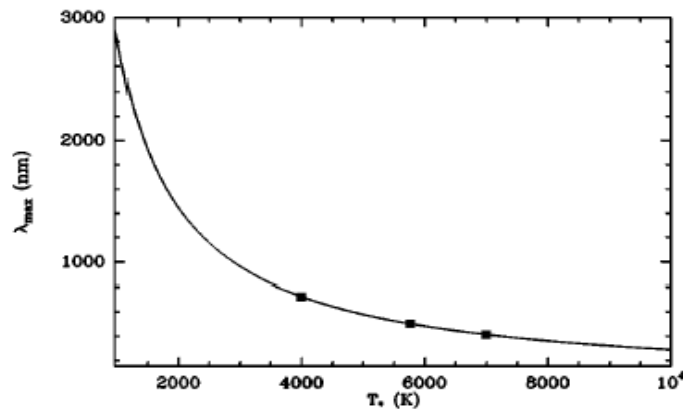
$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (15)$$


Figure 14 : Déplacement λ_m en fonction de la température [7]

La deuxième loi de $L_{\lambda m}^0$ s'exprime sous la formule suivante :
$$L_{\lambda m}^0 = B T^5 \quad (16)$$

Avec $B = 1.287 \cdot 10^{-5} \text{ w / m}^3 \cdot \text{k}^5$ est la constante de Wien.

- Loi de Stefan Boltzmann : Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température absolue [7] :

$$M^0 = \sigma T^4 \quad (17)$$

Avec $\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{K^4}{C_0^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w / m}^2 \cdot \text{k}^4$.

- Emissivité totale d'une surface : C'est le rapport entre luminance de cette surface et la luminance du corps noir à la même température :

$$\epsilon_{iT} = \frac{L_{iT}}{L_T^0} \quad (18)$$

- Facteur d'émission spectral d'une surface : C'est un rapporte entre luminance spectrale de cette surface et luminance celle du corps noir à la même température et pour la même longueur d'onde :

$$\varepsilon_{i\lambda T} = \frac{L_{i\lambda T}}{L_{\lambda T}^0} \quad (19)$$

- Propriétés des corps noir : Soit une surface quelconque différente du corps noir (ne rayonne pas comme un corps noir) désigné par une surface s, le corps c reçoit une incidence i de flux $\Phi_{i\lambda}^i$ de longueur d'onde λ une partie de ce flux réfléchi $\Phi_{i\lambda}^r$ par s le reste pénètre à l'intérieure de c, une partie ressort (transmission) $\Phi_{i\lambda}^t$, le reste a été absorbé par le corps c $\Phi_{i\lambda}^a$.

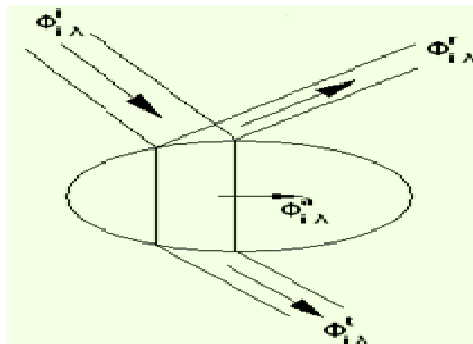


Figure 15 : Définition des propriétés radiatives [6]

Si $\Phi_{i\lambda}^i, \Phi_{i\lambda}^r, \Phi_{i\lambda}^t, \Phi_{i\lambda}^a$ sont les flux monochromatique de même longueur d'onde on a :

$$\alpha_{i\lambda} = \frac{\Phi_{i\lambda}^a}{\Phi_{i\lambda}^i} ; \quad \rho_{i\lambda} = \frac{\Phi_{i\lambda}^r}{\Phi_{i\lambda}^i} ; \quad \tau_{i\lambda} = \frac{\Phi_{i\lambda}^t}{\Phi_{i\lambda}^i} \quad (20)$$

Le rayonnement thermique qui est un rayonnement électromagnétique peut se présenter sous trois formes d'énergie : émission, absorption, réflexion et diffusion. L'émission par rayonnement est obtenue lorsqu'un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission. On le note Φ_i . L'absorption par rayonnement est l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé (noté Φ_a). La réflexion ou la diffusion par rayonnement est le cas où au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi. Dans ces conditions, on distingue 2 cas : L'optique géométrique (il s'agit alors de réflexion) et la diffusion pour toutes les directions. On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente. La somme de ces deux flux est notée Φ_r .

II. Matériaux fonctionnels :

Dans les dispositifs solaires à effet de serre, il y a plusieurs familles de matériaux fonctionnels qu'on peut utiliser pour leurs propriétés physiques, optiques ou radiatives : Les matériaux absorbeurs, les matériaux transparents et enfin les matériaux isolants.

2.1 Matériaux absorbeurs :

L'absorbeur joue un rôle principal dans le capteur solaire. C'est généralement un corps noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il converti le rayonnement solaire capté en énergie calorifique. Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes : Un bon coefficient d'absorption, une bonne conductivité thermique et une bonne résistance à la corrosion.

Donc, deux fonctions incombent à l'absorbeur :

- absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible,
- transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de perte.

Le choix du matériau absorbeur et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur solaire. Du fait de leur conductivité élevée, les absorbeurs sont généralement métalliques comme le cuivre, l'acier ou l'aluminium. Ils peuvent être des polymères dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau saumâtre. L'emploi des polymères entraine des différences notables comparées aux métaux : Ils ont l'avantage d'être légers, d'avoir la possibilité de teinter le produit dans la masse et d'avoir une faible sensibilité à la corrosion. Toutefois, ils ont une mauvaise conductibilité thermique, et sont susceptibles à un vieillissement dû au rayonnement U.V et d'avoir une tenue médiocre aux températures élevées. Quelques caractéristiques de ces matériaux sont données dans le **Tableau 1.1**.

Tableau 1.1 : Caractéristiques physiques de divers matériaux absorbeurs

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.°C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,90
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2 – 0,4	7 - 20
Polyéthylène	0,48	$2 \cdot 10^{-4}$

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité et une faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective [8] qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R. Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir. De plus, il devra être la plus léger possible afin de limiter l'inertie de mise en régime. Des considérations simples sur les échanges radiatifs au niveau du

revêtement de l'absorbeur montrent que, suivant la température à laquelle est portée la surface d'absorption, l'établissement des bilans thermiques peut se faire suivant deux schémas distincts, simples dans le cas des basses et moyennes températures et plus complexe dans le cas des hautes températures. En effet, le revêtement permet au flux solaire d'être absorbé par la surface revêtue, elle doit être réalisée avec un matériau transparent pour le domaine spectral correspondant ($0,25 < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$). Si ce revêtement est une surface sélective, elle doit être absorbante pour ce même domaine de longueur d'onde. Par contre, il faut qu'elle s'oppose aux échanges radiatifs avec le milieu environnant. Tant que la température de la surface d'absorption est relativement peu élevée ($T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$), les domaines spectraux d'émission ne se recouvrent pas. On peut donc imaginer l'existence de matériaux transparents ou surfaces sélectives absorbantes pour le domaine spectral allant de $0,25 < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$ et de matériaux opaques ou surfaces sélectives peu émissives dans le reste du domaine spectral. Ainsi, on voit apparaître une longueur d'onde de coupure (ou frontière) qui sépare les deux domaines spectraux à comportement optique différencié. Il n'en va pas de même à haute température ($T > 200 \text{ }^\circ\text{C}$) car il y a alors recouvrement partiel entre les deux spectres considérés. La longueur d'onde de coupure ne peut donc plus se trouver entre les deux domaines spectraux considérés et, suivant sa position, il y a amputation d'une partie du rayonnement soit par le :

- Spectre solaire incident et donc diminution du flux solaire pouvant être absorbé par la surface d'absorption,
- Spectre d'émission de la surface d'absorption d'où augmentation des pertes radiatives,
- De chacun de ces deux spectres en même temps et donc, de manière concomitante, diminution du flux solaire absorbé et augmentation des pertes radiatives.

Le matériau sélectif recherché devra répondre à cette contrainte de l'effet de température sur la longueur d'onde de coupure où cette dernière doit être la plus élevée possible de l'infrarouge. Son rendement de conversion sera alors sensiblement augmenté du fait de la réduction des pertes radiatives. Le plus souvent, une surface sélective résulte de l'association d'un film et d'un support métallique poli. Le film doit absorber l'énergie solaire et être transparent à l'infrarouge, donc présenter une émissivité thermique faible. L'épaisseur du film absorbant doit rester faible, en générale de quelques dixièmes de microns car dans ce cas la réflectance du métal de base dans l'infrarouge thermique n'est que très légèrement modifiée et l'émissivité de la surface est proche de celle du métal de base. Il existe différentes manières de réaliser de tels films qui sont :

- L'absorption par film semi-conducteur,

- L'absorption par film multicouches,
- L'absorption par l'empilement Absorbant + Réflecteur infrarouges,
- Sélectivité par utilisation de surfaces texturées,
- Matériaux intrinsèques,
- Filtres interférentiels par empilement de plusieurs couches alternées de deux matériaux ayant des indices optiques différents.

Selon les caractéristiques escomptées, il est plus judicieux de considérer les facteurs d'absorption α et d'émission ε que le rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon}$, parfois utilisé, et qui ne permet de déterminer que la température de stagnation des dispositifs à effet de serre, température atteinte lorsqu'une Calorie n'en est extraite. Ainsi, on peut évaluer l'intérêt de différents absorbeurs sélectifs en tenant compte à la fois des propriétés optiques de l'absorbant et des conditions de fonctionnement des dispositifs à effet de serre. Dans ce sens, la surface sélective devra supporter la température de fonctionnement, des cycles thermiques d'amplitude et de durée très variables, quelques excursions à sa température de stagnation en cas d'arrêt de la circulation du fluide de transfert. Ces contraintes externes peuvent entraîner un certain nombre de détériorations de la surface sélective. Comme détériorations, on peut avoir soit un trop grand écart entre les coefficients de dilatation du substrat et des matériaux composant la surface sélective ou encore la diffusion d'une couche dans l'autre surtout dans le cas où la sélectivité est obtenue par effet d'interférences. On peut réduire le risque de diffusion en interposant des barrières de diffusion entre les couches optiquement actives, mais plus l'empilement est complexe, plus grand est le risque de détérioration par inter-diffusion. En plus de leur stabilité thermique, les surfaces sélectives doivent être chimiquement inertes et présenter une cinétique de réaction extrêmement lente afin de résister aux divers types de corrosion auxquels elles peuvent être soumises. Pour cela, la sélectivité de l'absorbant peut être améliorée au moyen de traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro-physiques. Trois facteurs devront être pris en considération avant de choisir un absorbant sélectif comme solution à la conception des dispositifs à effet de serre qui sont :

- La stabilité des propriétés optiques,
- la stabilité physico-chimique
- et le coût de la réalisation des surfaces sélectives.

Avec l'utilisation des absorbeurs sélectifs, on obtient un gain appréciable à toutes températures et particulièrement au-delà de 60 °C. Il est remarqué aussi que le rendement d'un absorbant sélectif recouvert d'un simple vitrage est supérieur à celui d'un absorbant non

sélectif équipé d'un double vitrage. En fait, l'utilisation simultanée d'un vitrage sélectif et d'un absorbeur sélectif ou d'un double vitrage non sélectif et d'un absorbeur sélectif ne conduit pas à amélioration sensible des performances tout en entraînant un surcoût important. Il convient de noter que des températures supérieures à 100 °C peuvent être obtenues avec des capteurs plans sélectifs avec un rendement de conversion acceptable. Ce type de capteur peut donc être utilisé avec efficacité pour toutes les applications aux moyennes températures : réfrigération, conditionnement d'air, dessalement d'eau. Pour les hautes températures, il est nécessaire d'utiliser des systèmes concentrateurs du flux solaire et dans ces conditions on a vu que les pertes par conversion et conduction pouvaient être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives. Les plus importantes surfaces sélectives sont données dans le **tableau 1.2** [8]:

Tableau 1.2 : Caractéristiques physico-chimiques de diverses surfaces sélectives.

Surface et traitement	Absorptivité	Emissivité	Effet de l'humidité
Acier et Nickel noir sur Nickel	0,95	0,07	Variable
Acier et Chrome noir sur Nickel	0,95	0,09	Sans effet
Acier et Chrome noir	0,91	0,07	Oxydation rapide
Cuivre et Chrome noir	0,95	0,14	Peu d'effets
Acier galvanisé et Chrome noir	0,95	0,16	Pèle rapidement
Cuivre et Cuivre noir	0,88	0,15	
Acier et Oxyde de Fer	0,85	0,08	Peu d'effets
Aluminium et oxyde de manganèse	0,70	0,08	
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0,90	0,16	Peu d'effets
Acier et couche organique sur chrome noir	0,94	0,20	Peu d'effets
Peinture noire	0,92 – 0,97	0,85	
Tinox	0,95	0,05	
Traitement sous vide	> 0,95	< 0,05	

2.2 Matériaux transparents :

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques, le verre sécurisé est principalement utilisé comme couverture transparente. Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire. Dans le cas de capteurs intégrés en toiture, des matières synthétiques sont parfois utilisées. Leur durée de vie est plus faible que celle du verre ordinaire, mais elles sont plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre. Le vitrage est légèrement structuré et disperse, afin de diminuer un éventuel éblouissement. Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont le coefficient de transmission (τ) et l'émissivité (ε). Le coefficient de transmission (τ) est déterminé par la structure du vitrage (simple, double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage). Les propriétés physiques du verre sont données au **tableau 1.3** :

Tableau 1.3 : Caractéristiques physiques du verre

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8 %	9 %	83 %
Verre basse teneur en Fe ₂ O ₃	8 %	2 %	90 %

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur. Au **tableau 1.4** sont données les caractéristiques optiques des matériaux, utilisés comme couverture transparente :

Tableau 1.4 : Caractéristiques des couvertures transparentes

Matériaux	Indice de réfraction	Epaisseur (mm)	Transmittivité
Verre	1,518	3 - 4	0,840
Lexan	1,586	3 - 4	0,840
Teflan	1,343	0,05	0,960
Tedlar	1,460	0,10	0,920
Mylar	1,640	0,10	0,870
Kynar	1,410	0,10	0,930
Marlex	1,50	0,10	0,920

Actuellement le verre le plus utilisé dans les capteurs solaires plan est le verre prismé. Sa particularité est de diminuer la partie réfléchi du rayonnement contrairement au verre trempé. Lorsque l'angle d'incidence est faible, le verre prismé peut atteindre 96% de transmission.

2.3 Matériaux isolants :

La production et les performances des isolants thermiques ont marqué d'importants progrès ces dernières décennies et en particulier à partir des années 1970. Le nombre d'isolants disponibles sur le marché a augmenté et leurs propriétés thermiques et d'aptitude à l'emploi ont été sensiblement améliorées. Trois facteurs qui ont joué un rôle important dans la réalisation de ces progrès peuvent être mentionnés :

- l'évolution rapide et l'amélioration des technologies de fabrication des isolants avec une augmentation des productivités et une réduction des coûts,
- l'approfondissement des connaissances physiques du fonctionnement des isolants,
- la mise en place d'un système de contrôle de qualité pour garantir les propriétés des produits manufacturés, d'une part, par l'élaboration de normes pour définir et quantifier les propriétés des isolants et fixer les méthodes de mesure avec la mise au point d'appareils et matériaux de référence, en l'organisation d'un ensemble de procédures de contrôle de fabrication et de certification des produits.

Malgré les progrès déjà entamés, on ne peut pas dire que l'effort de recherche et de développement dans le domaine des isolants thermiques a été affaibli. En effet, les différentes tendances relevées à l'heure actuelle qui ouvrent de nouvelles perspectives sont notamment :

- l'étude de nouveaux gaz interstitiels de basses conductivités thermiques, non nuisibles à la couche d'ozone atmosphérique,

- l'extension du domaine d'utilisation des super isolants, en particulier les nanomatériaux et les isolants sous vide dans le domaine de la température ambiante et du bâtiment (double vitrage de haut pouvoir isolant, paroi transparente, etc.),
- le développement d'applications spécifiques des isolants, par exemple l'isolation dynamique réunissant à la fois l'utilisation des isolants à hautes performances, l'inertie thermique des bâtiments et les apports solaires,
- une meilleure maîtrise de la structure morphologique de la matrice solide des isolants (contrôle de l'anisotropie et répartition de masse volumique) pour améliorer le pouvoir isolant. Cela pour ne citer que quelques-unes des orientations actuelles des recherches et développement dans un domaine d'activité en pleine évolution.

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ces matériaux doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan. L'isolant doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, on doit considérer les paramètres suivants : La masse volumique, la température maximale en régime permanent, la résistance au feu, aux rongeurs et à la putréfaction et la sensibilité à l'humidité et son coût. Le critère de classification des isolants thermiques généralement retenu [9] repose sur la structure de leur matrice solide et sur la nature chimique de la substance qui la constitue : isolants fibreux, cellulaires, granulaires de nature minérale et organique.

2.3.1 Isolants fibreux :

Les isolants fibreux minéraux sont manufacturés à partir de matières amorphes fondues : roche (basalte en particulier), verre, silice vitreuse et oxydes métalliques. Les principaux représentants sont les laines minérales et les isolants en fibres céramiques (silice-alumine). Les isolants fibreux organiques peuvent être d'origine naturelle, comme les fibres ou laine de bois, la laine animale (mouton) ou manufacturés à partir de matières plastiques comme les fibres de polyester (**tableau 1.5**).

Tableau 1.5 : Matériaux isolants fibreux

Isolant	Masse volumique (Kg/m ³)	Température limite (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)
Laine de roche	18 à 180	≤ 600	0,047
Laine de verre	7 à 130	≤ 400	0,049
Laine de silice	8 à 100	≤ 1100	0,04
Fibres de silice-alumine	40 à 200	≤ 1260	0,06
Fibre de bois	200 à 250	≤ 100	0,06
Fibre de polyester	10 à 35	≤ 95	0,05
Laine de mouton	10 à 35	≤ 100	0,041

Pour renforcer la résistance mécanique et la tenue de ces isolants à matrice solide non consolidée, les fibres sont généralement agglomérées avec des faibles quantités de résines synthétiques ou autres types de liants (ciment, etc.). Ils sont commercialisés sous forme de feutres flexibles se présentant en rouleaux ou panneaux semi-rigides et de panneaux rigides.

Lorsque le produit est livré comprimé, il doit reprendre son épaisseur nominale après décompression et pose, pour laquelle la résistance thermique est annoncée. Pour l'isolation des tuyauteries, le matériau est préformé sous forme de cylindre annulaire en un ou deux éléments (coquilles). Les feutres et les panneaux peuvent être recouverts avec des revêtements de surface ayant un rôle fonctionnel (papier kraft-bitume ou kraft-aluminium formant pare-vapeur, voile de verre renforcé améliorant la tenue mécanique, feuille d'aluminium pour les applications haute température en particulier pour les coquilles) ou esthétique (kraft-aluminium laqué de différentes couleurs pour les plafonds, etc.).

2.3.2 Isolants cellulaires :

Ce sont les matériaux poreux à matrice solide consolidée contenant des cellules fermées ou ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial (**tableau 1.6**).

Tableau 1.6 : Matériaux isolants cellulaires

Isolant	Masse volumique (Kg/m ³)	Température limite (°C)
Béton cellulaire	375 à 825	< 400
Verre cellulaire	110 à 140	- 260 à 430
Polystyrène expansé	7 à 35	< 95
Polystyrène extrudé	25 à 40	< 95
Polyuréthane et polyisocyanurate	27 à 60	- 200 à 100
Polychlorure de vinyle	25 à 48	< 95
Mousse phénolique	30 à 100	- 200 à 120
Mousse souple élastomère	40 à 100	- 180 à 105

Parmi les isolants cellulaires d'origine minérale, les plus répandus sont le béton cellulaire léger et le verre cellulaire. Les isolants cellulaires organiques manufacturés sont représentés par une grande diversité de matériaux plastiques alvéolaires et de mousses à base de produits carbonés : le polystyrène expansé et extrudé, le polyuréthane, le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère.

Ces matériaux se présentent sous forme de panneaux semi-rigides ou rigides (les polystyrènes, par exemple) de plaques, de blocs et de coquilles et plus rarement sous forme de rouleaux. Très souvent, les panneaux sont recouverts par des revêtements de protection, éventuellement étanches pour préserver le gaz en fermé dans les cellules (le cas des polyuréthanes, par exemple). Il faut citer également l'application des mousses (polyuréthane en particulier), par injection *in situ*, dans des espaces confinés à isoler.