

Chapitre I: Effet de serre et surfaces sélectives

I. Effet de serre et surfaces sélectives

I.1. Effet de serre

L'effet de serre repose sur le fait que le rayonnement infrarouge émis par la surface de l'absorbeur n'a pas la même longueur d'onde que celui du rayonnement solaire. La couverture (en verre ou plastique transparent) est transparente au second mais pas au premier : le rayonnement solaire, absorbé par l'absorbeur, est réémit sous forme des rayons infrarouge vers la couverture transparente, mais cette dernière le bloque et le réémet une autre fois vers l'absorbeur (par réflexion ou par échauffement de la couverture). Tant que le soleil alimente le capteur le phénomène d'effet de serre se continuera, il y aura donc accumulation de la chaleur et la température de l'absorbeur s'élève.

On appelle effet de serre simple lorsqu'on a une seul vitre au dessus de l'absorbeur et effet de serre multiple lorsque le nombre des couvertures transparentes supérieur a une [1].

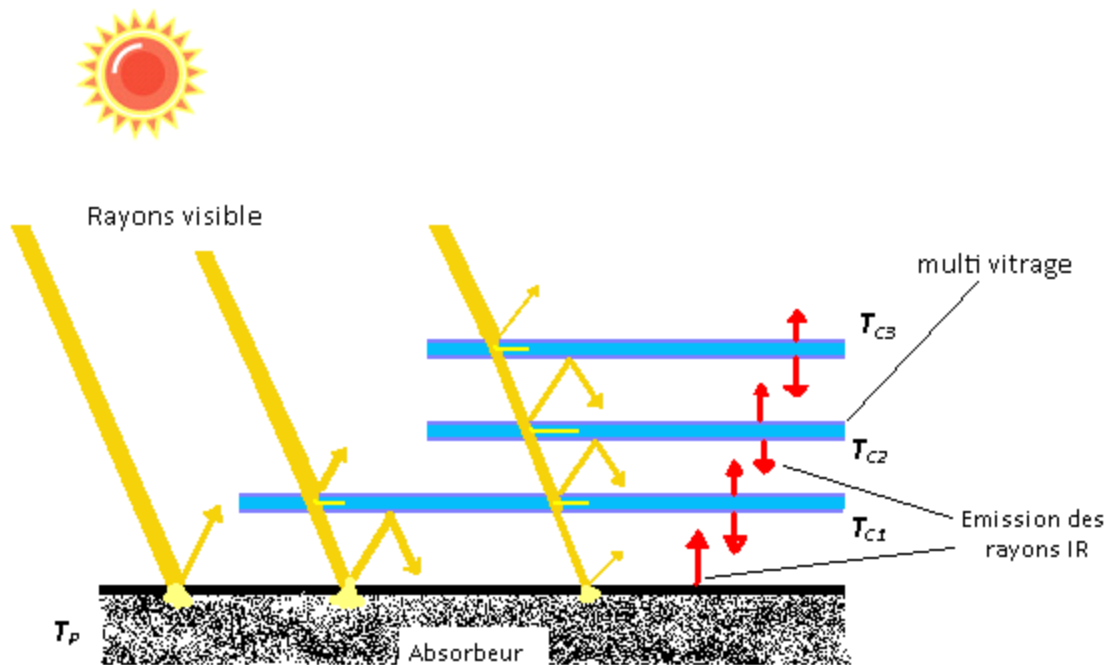


Figure I.1 : Principe de l'effet de serre

Le rôle de la couverture est essentiellement de réaliser une isolation optique de la face avant de l'absorbeur. Cette isolation doit avoir le comportement particulier suivant :

- Laisser se produire le maximum d'échange d'énergie dans le sens de l'environnement vers l'absorbeur ($\tau_c \cong 1$)
- S'opposer a tous les échanges inverses c'est-à-dire de l'absorbeur vers l'environnement ($\tau_{ci} \cong 0$)

Pratiquement la couverture est opaque dans le domaine de l'infrarouge (non transparente pour les rayons infrarouge ($\Delta\lambda_{IR}$)).

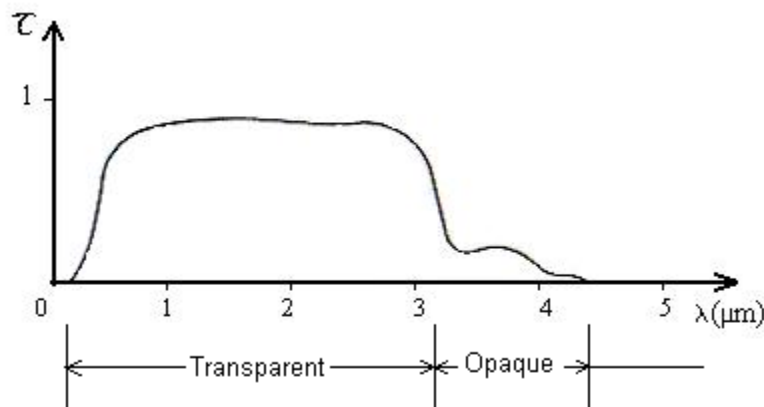


Figure I.2: Coefficient de transmission d'une lame de verre.

Dans les capteurs solaires plans, cette opacité peut prévenir de deux comportements distincts :

1. *Couverture réfléchissante*, elle renvoie vers l'absorbeur l'énergie qui aurait été perdu et reste froide.
2. *Couverture absorbante*, elle s'échauffe et réémet la chaleur sous forme des rayons infrarouges vers l'absorbeur.

La couverture devra donc jouer un rôle différent suivant les longueurs d'ondes considérées : elle devra être *sélective*.

I.2. Surfaces sélectives

Les principaux effets intervenant dans un capteur sont réunis dans l'absorbeur. Une part de l'énergie incidente est perdue par réflexion sur la couverture du capteur (s'il en possède une) et sur la surface de l'absorbeur (pertes optiques). Une autre part de l'énergie thermique produite par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement du capteur par convection, conduction et rayonnement (pertes thermiques). Les pertes thermiques par convection et conduction sont en première approximation proportionnelles à

la température tandis que les pertes thermiques par rayonnement sont proportionnelles à la puissance quatrième de la température, conformément à la loi de Stefan- Boltzmann.

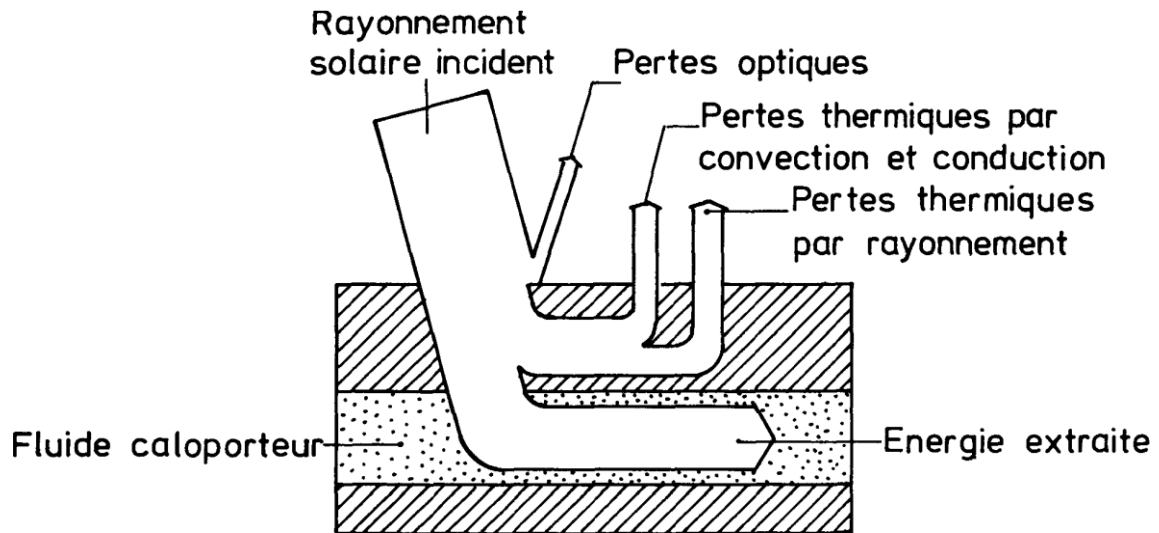


Figure I.3 : Pertes thermiques dans un capteur solaire

L'effet des pertes radiatives, plus intrinsèquement lié aux propriétés optiques des matériaux de l'absorbeur et du vitrage, devient plus, important puis prépondérant aux moyennes puis aux hautes températures.

L'accroissement du rendement peut alors être obtenu, par action sur les propriétés optiques des matériaux composant la couverture et la surface de l'absorbeur de façon à conserver ou augmenter l'absorption de l'énergie solaire incidente et simultanément diminuer ses pertes radiatives à la température de fonctionnement.

Dès 1956, Tabor a recommandé l'utilisation de telles surfaces afin d'accroître le rendement des capteurs solaires. Lorsque le capteur comporte un vitrage disposé en avant de l'absorbeur proprement dit (afin de diminuer les pertes convectives et utiliser l'effet de serre) on peut envisager d'approcher ces conditions idéales de deux manières différentes : la première consiste à équiper le capteur d'un **absorbeur sélectif**. Une deuxième solution consiste à utiliser un **vitrage sélectif** [2].

I.2.1. Critères de choix d'une surface sélective :

➤ Propriétés optiques :

Seules l'absorptivité et l'émissivité spectrales pouvaient rendre compte dans le détail des propriétés optiques d'une surface sélective.

➤ **Stabilité physico-chimique :**

Il est primordial que les propriétés optiques définies plus haut ne se dégradent pas ou très peu au cours de l'utilisation du capteur. Ceci suppose que la surface sélective supporte la température de fonctionnement, qu'elle ne soit pas affectée par les cycles thermiques d'amplitude et de durée très variables auxquels elle sera soumise et enfin, qu'elle puisse supporter quelques excursions à sa température de stagnation T_{max} 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. Un premier type de détérioration peut être dû à un trop grand écart entre les coefficients de dilatation du substrat (en général cuivre, aluminium ou acier à faible teneur en carbone) et des matériaux composant la surface sélective. Un second type de détérioration est la diffusion d'une couche dans une autre : diffusion chimique ou par les joints de grains. Ce processus conduit dans les deux cas à une détérioration rapide. Ce risque est particulièrement grand 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 il est bien évident que, plus l'empilement réalisé pour obtenir la sélectivité est complexe, plus grand est le risque de détérioration par interdiffusion. Enfin, en plus de leur stabilité thermique, les surfaces sélectives doivent être chimiquement inertes, ou pour le moins présenter une cinétique de réaction extrêmement lente afin de résister aux divers types de corrosion auxquels elles peuvent être soumises. La surface sélective devra donc résister à l'oxydation lorsqu'elle est chauffée et/ou soumise à une irradiation ultraviolette. Le risque d'attaque chimique pendant le stockage avant utilisation ne doit pas non plus être négligé.

➤ **Coût de fabrication :**

Il est évident que pour un constructeur de capteurs, une surface sélective est rentable par rapport à un corps noir ou toute autre surface sélective seulement si la quantité de chaleur supplémentaire collectée compense la différence de coût. Cet argument ne devrait cependant pas freiner la recherche au laboratoire de solutions à priori un peu coûteuses soit par les matériaux, soit par les techniques d'élaboration utilisées car l'évolution des techniques et leur transfert à une échelle industrielle modifient les coûts dans des proportions difficilement appréciables. Enfin, compte tenu de la stabilité physicochimique exigée de tout absorbeur, sélectif ou non, il n'est pas évident que l'absorbeur sélectif stable soit beaucoup plus coûteux

que son équivalent non sélectif stable. Ce sont cependant les matériaux relativement bon marché associés aux techniques de préparation peu coûteuses (conversion chimique, électrolyse, dépôt chimique en phase vapeur...) qui présentent actuellement le plus d'intérêt.

I.2.2. Différents types d'absorbeurs sélectifs

Il existe différents types d'absorbeurs sélectifs et la Figure ci-dessous résume les principaux types d'absorbeurs, qui vont être détaillés par la suite [2, 3].

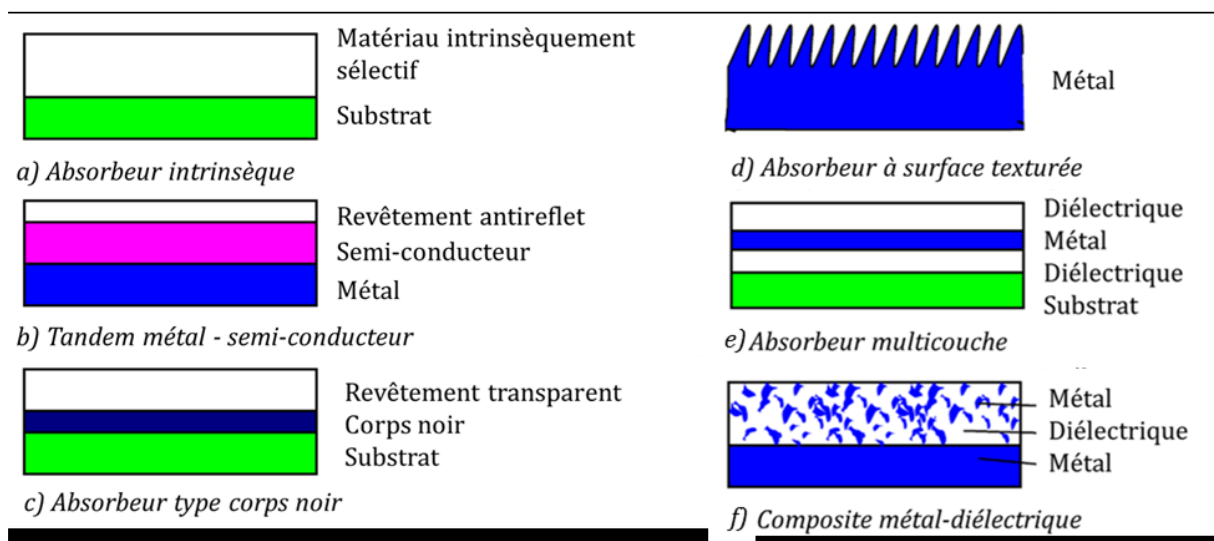


Figure I.4 : Principaux types d'absorbeurs

➤ Les absorbeurs intrinsèques

Un absorbeur intrinsèque c'est un matériau qui, par ses propriétés intrinsèques (notamment sa structure électronique) présente un comportement optique spectralement sélectif, déposé sur un substrat. Ce type d'absorbeurs est simple et stable, mais sa sélectivité optique est assez réduite. Ce type de propriétés se retrouve principalement chez les métaux de transition et les semi-conducteurs dopés spécifiquement pour améliorer leurs propriétés optiques. Des exemples de matériaux intrinsèquement sélectifs sont : le tungstène (W), le carbure d'hafnium (HfC) ou encore, le silicium dopé au bore. Le plus souvent, ces matériaux ne sont pas utilisés directement en tant qu'absorbeurs, mais sont utilisés comme composants dans les autres types d'absorbeurs au vu de leur bonne sélectivité. Certains, comme le carbure de zirconium (ZrC) sont employés directement comme absorbeur du fait de leur stabilité en température.

➤ **Les absorbeurs tandem métal – semi-conducteur**

Dans les absorbeurs tandem métal – semi-conducteur, l'absorption se fait dans la couche de semi-conducteur, du fait du gap du matériau, et le métal sert de réflecteur infrarouge. Une couche antireflet est nécessaire, car les semi-conducteurs utilisés pour ces applications ont un indice optique élevé qui va entraîner des pertes optiques par réflexion à la surface du semi-conducteur. Pour cette application, les semi-conducteurs utilisés doivent avoir un gap de l'ordre de 0,5 à 1,26 eV. Peuvent être employés par exemple le silicium (Si), le germanium (Ge) ou le sulfure de plomb (PbS), dont les gaps sont respectivement 1,1 eV, 0,7 eV et 0,4 eV. Le développement de ces absorbeurs nécessite l'amélioration des procédés pour le dépôt ou la croissance de couches semi-conductrices de qualité suffisante. Ces absorbeurs posent aussi des problèmes liés à l'interdiffusion des matériaux du semi-conducteur et du réflecteur infrarouge.

➤ **Les absorbeurs de type corps noir**

Les absorbeurs de type corps noir sont composés d'une couche de matériau transparent, le plus souvent un semi-conducteur hautement dopé ($\text{SnO}_2:\text{F}$, $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, $\text{In}_2\text{SO}_3:\text{Sn}$, ou $\text{ZnO}:\text{Al}$) recouvrant un matériau ayant des propriétés optiques et thermiques proches de celles d'un corps noir. Ce type d'absorbeur ne présente pas une très grande sélectivité du fait de l'émissivité du corps noir dans l'infrarouge. Cependant, du fait de sa simplicité de fabrication (par exemple par dépôt électrolytique d'oxyde de chrome) il est très utilisé pour les applications à basse température, comme les chauffe-eau solaires pour particuliers. Dans certains cas, des peintures noires spécialement conçues pour ces applications sont aussi utilisées, mais toujours à basse température et elles nécessitent de repeindre les tubes régulièrement.

➤ **Les absorbeurs à surface texturée**

La texturation de surface, est très utilisée pour réaliser des filtres optiques, dans tous les domaines de longueurs d'onde. En effet, selon la taille et la périodicité des structures présentes à la surface du matériau, les longueurs d'onde inférieures ou du même ordre de grandeur que la taille des motifs vont être absorbées. En revanche, pour les grandes longueurs d'onde, la surface se comportera comme un miroir. En adaptant la taille des motifs, il est donc possible de rendre une surface fortement sélective du point de vue optique.

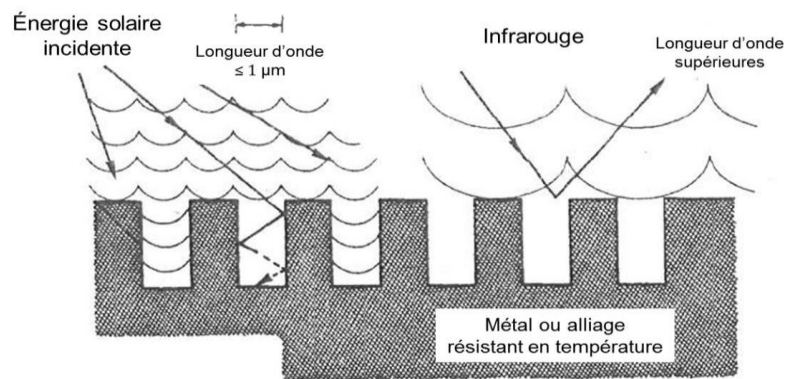


Figure I.5: Absorbeur à surface texturée

➤ **Les absorbeurs multicouches**

Les absorbeurs multicouches, utilisent les interférences causées par les couches pour absorber efficacement la lumière. L'un des premiers absorbeurs développés date de 1975 et a été conçu par Peterson et al. pour des applications spatiales, qui impliquent un fonctionnement à 860°C et nécessitent une faible émissivité pour limiter les pertes à cette température. Cet absorbeur était un multicouche de type AMA pour Alumine/Métal/Alumine, avec du molybdène comme métal, et déposé sur un substrat de molybdène. Cet absorbeur est stable sous vide à 900°C pendant 500h. Cette stabilité est intéressante pour les applications CSP terrestres, mais un substrat en molybdène est trop onéreux pour une transposition directe aux centrales CSP.

➤ **Les absorbeurs composite métal-diélectrique**

Les composites métal-diélectrique, aussi appelés cermet pour composite céramique-métal, sont constitués de particules métalliques dans une matrice diélectrique, déposés sur un substrat métallique. La partie cermet absorbe fortement dans le visible, du fait des transitions inter-bandes dans les particules métalliques et de la résonance entre les particules, mais reste transparente dans l'infrarouge. La couche métallique en dessous sert de réflecteur infrarouge.

I.2.3. Vitrages sélectives

Le vitrage permet de créer un effet de serre dans la couche d'air emprisonnée entre la vitre et l'absorbeur; ce qui permet d'améliorer le rendement du capteur, car le rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur est piégé par la vitre qui est opaque (mais pas au rayonnement dans le domaine visible). Un vitrage efficace doit absorber au maximum et réfléchir au minimum le

rayonnement peu importe son inclinaison; il doit aussi résister dans le temps aux effets de l'environnement (pluie, grêle, ...) et aux variations de températures [4].

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'optimiser le rendement des capteurs solaires. Parmi lesquelles, celles qui interviennent sur les performances thermiques et optiques de la couverture transparente. Plusieurs techniques utilisées ont permis d'apporter une amélioration notable sur le rendement thermique des dits capteurs [5].

➤ **Le verre à faible teneur en fer :**

Réduire la teneur en fer d'un verre permet d'améliorer efficacement la transmission de la lumière et le rendre moins absorbant aux rayonnements solaires et par conséquent, d'optimiser le rendement thermique des collecteurs solaires. Des études réalisées ont montré que les températures moyennes mesurées sur le verre classique sont plus élevées que celles obtenues pour les verres à faible teneur en fer. Le flux de chaleur stationnaire transmis à travers la vitre, dans le cas du verre à faible teneur en fer, est plus élevé que celui obtenu pour la couverture en verre clair et par conséquent, le rendement instantané du système est plus élevé dans le cas d'une couverture en verre à faible teneur en fer.

➤ **Les couches poreuses de silice :**

L'utilisation des couches poreuses de silice comme revêtement anti-reflet ; un revêtement à l'aide d'une couche poreuse de silice de 110 nm et d'une porosité d'environ 35% augmenterait la transmission de la lumière d'un verre de borosilicate à 550 nm de 92% à 97%. La transmission lumineuse obtenue à l'aide d'un verre doté d'une couche de revêtement à base de SiO₂ poreux par procédé sol-gel, en comparaison avec le taux de transmissivité obtenu avec un verre ordinaire.

➤ **Verres nano-structurés :**

La nano-structuration est l'une des techniques qui permet d'améliorer la clarté du verre et ainsi d'augmenter sa transmissivité aux rayonnements lumineux. Le procédé de nano-structuration utilisé pour une vitre d'une cellule solaire a permis une amélioration des performances des cellules solaires en raison d'une augmentation de la transmissivité optique à travers le filet de verre nano-structuré. La mesure de la transmission des nanostructures de

hauteur inférieure à 400 nm présente une augmentation de la transmission optique sur l'ensemble de la gamme spectrale de longueur d'onde allant de 300 nm à 800 nm. Le verre normal montre une transmissivité de 92% pour les grandes longueurs d'onde (450 nm-800 nm) et moins de 85% pour les petites longueurs d'onde (300 nm-350 nm). Des échantillons des nanostructures, de 10nm de hauteur, montrent une transmissivité de 95% sur la plupart de la gamme spectrale, ce qui représente une amélioration de 10% dans la gamme de courtes longueurs d'onde (350 nm-450 nm) et une amélioration de 3% dans la gamme des grandes longueurs d'onde. Cependant, toutes les nanostructures avec des hauteurs allant jusqu'à 400 nm montrent une amélioration dans la transmission optique.

➤ **Surface ondulée du collecteur:**

La conception de capteurs solaires adaptés qui conduit à augmenter le gain d'énergie utile et de réduire les pertes de chaleur, par le biais principalement de la face supérieure, est le principal sujet de nombreuses recherches qui recommandent l'utilisation des surfaces fines ou ondulées pour améliorer le rendement thermique des capteurs.

➤ **Vitrage à couvertures combinées (plastique-verre) :**

Il découle de l'analyse menée sur les capteurs à couverture combinée "plastique - verre" que les performances thermiques sont sensiblement meilleures que celles du capteur à double vitrage de même type, car la valeur du rendement optique ($\tau\alpha$) du premier capteur cité est légèrement plus élevée que celle du second, et les pertes thermiques sont approximativement égales pour les deux capteurs. Néanmoins, le plastique a tendance à perdre ses caractéristiques optiques en vieillissant et en particulier quand ce dernier est exposé aux conditions environnementales extérieures.