

ETUDE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES OPTIQUES DES REVETEMENTS SELECTIFS APPLICATION AUX ABSORBEURS DES CHAUFFE-EAU SOLAIRES

A. CHIKOUCHE, F.HADDAD et R. SELLAMI

Unité de Développement des Equipements Solaires U.D.E.S, Route Nationale N° 11, BP 386,
Bouismail 42415, W. de TIPAZA, ALGERIE
E-mail : faouzi72dz@yahoo.fr

RESUME

Les capteurs héliothermiques solaires sont utilisés pour le chauffage de l'eau domestique. Ils transforment le rayonnement solaire en énergie thermique, laquelle chauffe un fluide caloporteur. L'un des importants composants du capteur héliothermique solaire est l'absorbeur, qui doit avoir une sélectivité aux longueurs d'ondes du rayonnement solaire. Cette sélectivité lui permet un maximum d'absorbance avec un minimum d'émission thermique. L'objectif de notre travail consiste à caractériser ces surfaces sélectives. Une surface sélective est habituellement composée d'une couche ou d'un film mince absorbant dans le spectre solaire et transparent dans l'infrarouge thermique sur un support métallique d'émissivité faible (substrat). On aborde dans notre travail les mécanismes de sélectivité pour les différents substrats (cuivre « Cu », aluminium « Al »...) avec deux films sélectifs (TiO₂, SOLKOTE HI /SORB II « peinture à base de résine »). Les méthodes de caractérisations utilisées dans ce travail sont la spectroscopie pour des longueurs d'ondes allant de UV jusqu'au IR, l'ellipsométrie et la profilométrie pour le calcul des indices de réfraction et les épaisseurs.

Mots clés : Conversion photo-thermique, absorbeur chauffe-eau solaire, sélectivité spectrale, surface sélective, propriétés optiques, émissivité, couches minces.

NOMENCLATURE

H : puissance incidente	(W/m ²)
T : température	(K)
P : puissance perdue	(W/m ²)
α, α' : coefficients d'absorption	
ϵ : coefficient d'émissivité thermique	
η : rendement	
σ : constante de Stephan Boltzmann	(W/m ² -K)

Indices

c : convection et conduction
a : absorbeur
E: extérieure
r : reçue
p : perdue

1. INTRODUCTION

L'U.D.E.S (Unité de développement des équipements solaires) a développé dans les années 90 un chauffe-eau solaire dont l'absorbeur est constitué d'une plaque d'aluminium sur laquelle est appliquée une couche de peinture noire. Le but de notre travail consiste à optimiser cette couche sur le plan optique, physique et de point de vue support mécanique. Pour cela, on a déposé d'autres types de couches sélectives ultraminces sur deux types de supports en l'occurrence l'aluminium et le cuivre. Il y a aussi d'autres applications qui utilisent les interactions du rayonnement électromagnétique avec la matière : Cellules solaires, Fenêtres intelligentes, Détecteur IR, Satellite de communication...etc. En dépit de leurs diversités, toutes ces applications font appels à des couches ultra minces sur leurs surfaces dont les caractéristiques physiques et optiques sont fonction des longueurs d'ondes du spectre du rayonnement électromagnétique. De telles couches minces

déposées sur les surfaces agissent comme des filtres où certains photons, à des longueurs d'onde données, doivent être en mesure d'être réfléchi ou absorbé, tandis que d'autres, à des longueurs d'onde différentes, doivent être repoussés ou piégés. Cette capacité "filtrante" est une particularité de ce qu'on appelle les "surfaces sélectives".

2. BILAN THERMIQUE ET BILAN RADIATIF D'UN ABSORBEUR :

Un absorbeur, ayant ses faces arrières et latérales parfaitement isolées, exposé au rayonnement solaire, atteint une température d'équilibre telle que la puissance reçue soit égale à la puissance perdue. Cette puissance reçue par mètre carré est la somme de deux termes [1] :

$$P_r = \alpha H + \alpha' \sigma T_a^4 \quad (1)$$

La puissance perdue est, elle aussi, fonction de deux composantes [1] :

$$P_p = \varepsilon \sigma T^4 + P_c \quad (2)$$

Le bilan thermique par unité de surface est :

$$\varepsilon \sigma T^4 + P_c = \alpha' \sigma T_E^4 + \alpha H \quad (3)$$

Pour une surface « noire », $\alpha = \alpha' = \varepsilon = 1$, l'eq (3) devient :

$$H = P_c + \sigma(T^4 + T_E^4) \quad (4)$$

Dans le cas où une partie de la puissance absorbée est convertie en chaleur puis transmis au fluide, on doit tenir compte de cette puissance φ_u , soit :

$$\varphi_u + \varepsilon \sigma T^4 + P_c = \alpha' \sigma T_E^4 + \alpha H \quad (5)$$

Pour $H = \text{Cte}$, on définit le rendement de conversion η , tel que :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{H} = \alpha + \frac{\alpha' \sigma T_E^4}{H} - \frac{\varepsilon \sigma T^4}{H} - \frac{P_c}{H} \quad (6)$$

L'examen du bilan radiatif est effectué en prenant $P_c = 0$, soit :

$$\eta_R = \alpha + \frac{\alpha' \sigma T_E^4}{H} - \frac{\varepsilon \sigma T^4}{H} \quad (7)$$

On peut aussi écrire, en ajoutant et en retranchant $\frac{\varepsilon \sigma T_E^4}{H}$:

$$\eta_R = \alpha \left[1 - \frac{\varepsilon}{\alpha} \frac{\sigma(T^4 - T_E^4)}{H} \right] \quad (8)$$

En considérant l'eq (8), on peut dire que :

- Le rendement η_R est maximum si $T = T_E$, c'est à dire s'il y a pas d'élévation de température de l'absorbeur par rapport à la température extérieure.

- Il est possible d'accroître la valeur du rendement en augmentant le rapport α/ε .

En considérant la loi de Kirchhoff [2], on a, pour la longueur d'onde λ

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = 1 - R_{\lambda} \quad (9)$$

Les paramètres α et ε sont fonction des propriétés optiques de la surface, de la température T et de la longueur d'onde [2]. Pour réduire la valeur de (α/ε) , la surface doit avoir un faible coefficient de réflexion pour le spectre visible (VIS) tandis que pour l'infrarouge (IR), R_{λ} doit être élevé. D'où l'obtention d'une surface sélective car ces propriétés optiques varient en fonction de la longueur d'onde λ du spectre.

3. LA SELECTIVITE

Si l'on représente les propriétés optiques d'un absorbeur sélectif réel, dans un diagramme $R_{\lambda}(\lambda)$, on constate une augmentation du facteur R_{λ} dans l'infrarouge, qui peut être plus ou moins brusque suivant la surface sélective considérée. La figure 1 donne un exemple d'une telle variation, obtenue dans le cas du « chrome » ; cette surface présente deux domaines distincts où R_{λ} est faible pour $0.3 \leq \lambda \leq 2 \mu\text{m}$, ensuite égale à 0.9 pour $\lambda > 10 \mu\text{m}$, la transition entre les deux s'effectuant sur une étendue spectrale $\Delta\lambda$ de 2 à $10 \mu\text{m}$.

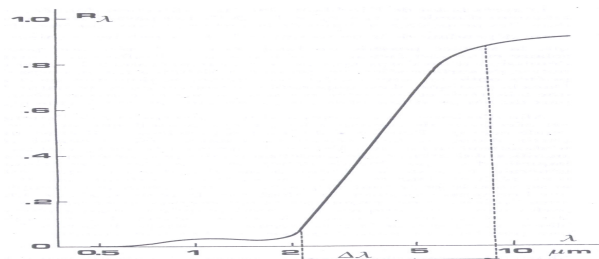


Figure 1. Variation de la reflectance en fonction de la longueur d'onde pour un Absorbeur sélectif réel – cas du chrome [3]

En ce qui concerne la surface absorbante, qui peut être assimilée à un filtre « passe- haut », il n'existe pas de corps, dans la nature, ayant les propriétés optiques idéales requises. Cependant, quelques matériaux comme le chrome, l'aluminium et le cuivre (figure 2) ont un comportement sélectif favorable pour la conversion thermique de l'énergie solaire

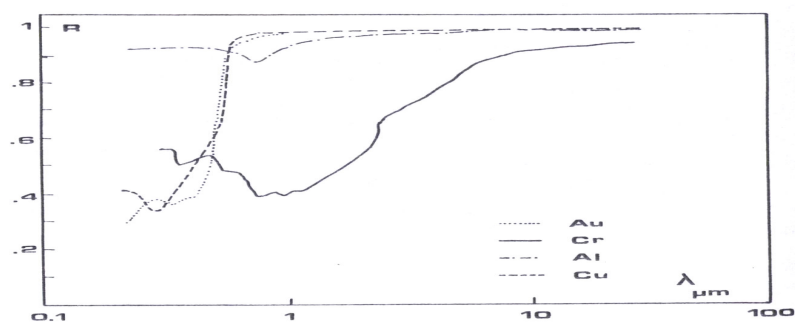


Figure 2. Variation de la reflectance en fonction de longueur d'onde pour Différents substrats [3]

4. EXPERIMENTATION

4.1 Dépôt des couches sélectives par la méthode sol-gel (dip-coating) :

Le dip-coating est une technique utilisée pour les dépôts réalisés sur des substrats présentant une symétrie de translation. Le substrat est plongé dans une solution de peinture (SOLKOTE

HI /SORB II) [7], et est retiré de la solution à vitesse constante et contrôlée afin qu'un film uniforme recouvre la surface immergée. Ce film est laissé à sécher pour quelques minutes afin de permettre la transition sol / gel. La vitesse de retrait peut varier entre 1 et 50 cm/min. Le dip-coater utilisé existe au niveau de l'UDTS (Unité de développement des technologies de silicium). La figure3 montre le schéma de principe du dip-coater que nous avons utilisé.



Figure3 : photo du dip-coater

4.2 Montage expérimental pour mesurer $R(\lambda)$:

Les courbes expérimentales, $R(\lambda)$, des couches sélectives déposées par la technique du dip-coating sur différents substrats sont mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre « Spectro 320 ». Ce spectrophotomètre peut balayer des longueurs d'ondes allant jusqu'à 2500 (nm).

4.3 Montage expérimental pour mesurer l'indice de réfraction et l'épaisseur :

L'ellipsométrie a été appliquée dans notre cas à la caractérisation des matériaux et des couches déposées. Si l'on connaît l'indice du substrat et celui de la couche déposée on peut alors déduire la valeur de l'épaisseur de la couche. On a opté pour l'ellipsométrie à cause de sa sensibilité à de faibles variations de l'épaisseur.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS :

5.1 Peinture noire sur l'aluminium

Dans un premier temps, on a déposé une couche de peinture noire identique à celle appliquée sur nos premiers chauffe-eau, fabriqués dans les années 1990, sur un substrat d'aluminium, en suite on a procédé à la caractérisation par spectroscopie pour mesurer le $R(\lambda)$, la figure 4 montre la courbe de réflectance en fonction de la longueur d'onde.

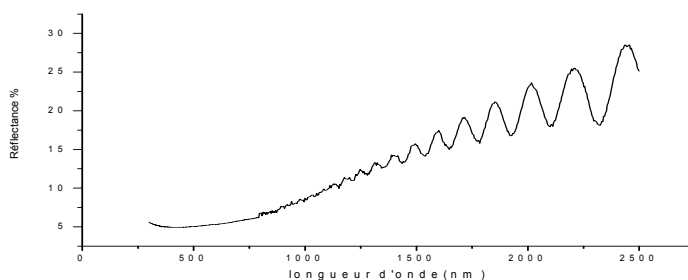


Figure 4. Variation de la réflectance $R(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde (λ) pour une Peinture noire sur aluminium.

On observe que la peinture noire produit une augmentation du coefficient d'absorption de la plaque absorbante ainsi que le coefficient d'émissivité thermique.

5.2 Peinture sélective (SOIKOTE HI/SORB II) sur Aluminium :

Dans un deuxième temps, on a choisi une deuxième solution sélective portant l'indication (SOLKOT HI/SORBII). Après avoir déposé différentes couches à partir de cette solution sur le substrat en aluminium, on a procédé à la caractérisation par spectroscopie. On a mesuré également

les épaisseurs des couches à l'aide de l'ellipsométrie décrite ci-dessus. La figure 5 montre la variation de la reflectance en fonction de λ pour différentes épaisseurs de couches déposées B, C, D et E.

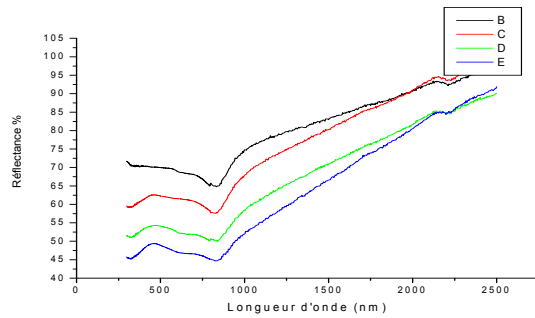


Figure 5. Variation de la reflectance en fonction de la longueur d'onde pour différents épaisseurs.

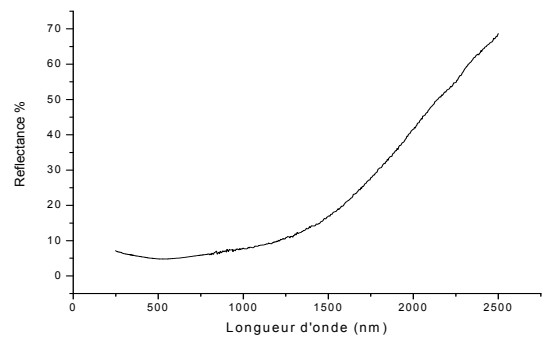


Figure 6. Variation de la reflectance en fonction de la longueur d'onde pour une épaisseur optimale de 25µm [4].

On observe une réduction de la reflectance au fur et à mesure que l'épaisseur des couches augmente (courbes B, C, D, E). Les épaisseurs et les indices de réfraction sont indiqués au tableau 1.

Tableau 1. Épaisseurs et indices de réfraction des couches de SOLKOTE HI/SORB II.

Couches	B	C	D	E
Épaisseurs (nm)	240	415	565	695
Indices de réfraction	1.54	1.58	1.60	1.61

La figure 6 montre la variation de la reflectance en fonction de la longueur d'onde pour une épaisseur optimale de 2.5µm. ce qui confirme la bonne sélectivité de cette solution.

5.3 Comparaison de la sélectivité de la solution (SOLKOTE HI/SORB II) en fonction de différents types de substrats :

Dans un troisième temps on a réalisé des dépôts de la solution sélective SOLKOT sur un substrat en silicium. Les résultats obtenus sont montrés sur figures 7.

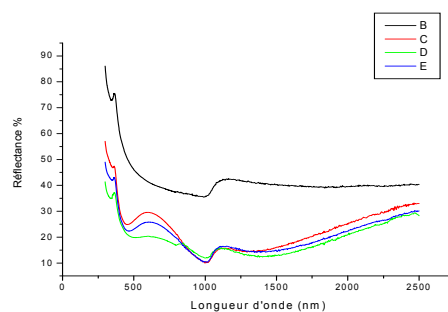


Figure 7. Variation de la reflectance en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de couches sur substrat en silicium.

On observe que le dépôt de la solution donne des résultats significatifs sur l'aluminium qui est d'usage pratique pour le capteur plan, tandis que la même solution n'est pas adaptée sur le silicium

(Cas module photovoltaïque).

5.4 Dépôt de TiO_2 sur un substrat de cuivre :

Enfin, nous avons caractérisé par spectroscopie des couches de TiO_2 déposées sur des substrats en cuivre (cas d'un absorbeur de chauffe-eau solaire fabriqué par Isofoton S.A) [5].

La courbe de reflectance en fonction de la longueur d'onde est donnée par la figure 8.

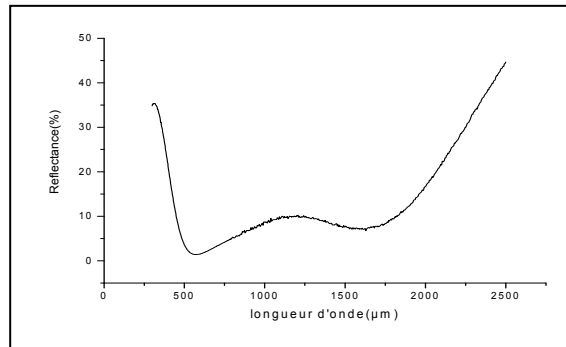


Figure 8. Variation de la refection en fonction de la longueur d'onde
Pour une épaisseur optimale 20μm de TiO_2 [5].

On observe une bonne sélectivité des couches déposées pour les deux gammes de spectre (VIS) et (IR).

6. CONCLUSION

Ces résultats de dépôt d'une ou de plusieurs couches sélectives permettent une augmentation importante du rendement de conversion du (CES). C'est dans ce cas que l'on peut envisager la réalisation des absorbeurs à haut rendement. En utilisant ces couches, on a trouvé une amélioration du rendement de conversion de 10 à 17%. Les couches sélectives déposées et caractérisées ont permis de mettre en évidence l'effet de sélectivité de la solution SOLKOT HI/SORBII sur aluminium et de TiO_2 sur cuivre. Le choix des technologies de dépôts de ces couches sélectives doit être simple et économique.

Remerciement

Nous tenons à remercier l'équipe de (U.D.T.S) pour leur apport bénéfique dans notre travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. P.Gallet, F.Papini et G.Péri, "Physique des convertisseurs héliothermiques", EDISUD, 1980.
2. J. A. Duffie et W. A. Beckman, "Solar energy of thermal process", Wiley, New York, 1974.
3. G. Peri, 'Les capteurs convertisseurs héliothermiques sous concentration', Association française pour l'étude et le développement de l'énergie solaire, Cahier n°4, Paris 1977.
4. www.solec.org, document technique de SOIKOTE HI/SORB II.
5. www.isoфoton.com, document technique chauffe eau solaire Isofoton plus.
6. M. Van Der Leij, "Spectral-selective surfaces for the thermal conversion of solar energy", Thèse Doctorat, Université de Delft, 1979.