

Comportement thermique d'un matériau bicouche soumis à haut flux radiatif

Antoine BOUBAULT^{1*}, Bernard CLAUDET², Olivier FAUGEROUX², Gabriel OLALDE¹, Jean-Jacques SERRA³

¹Laboratoire Procédés, Matériaux, et Energie Solaire (PROMES-CNRS), 7 Rue du Four Solaire, Odeillo, 66120 Font-Romeu

²Laboratoire Procédés, Matériaux, et Energie Solaire (PROMES-CNRS), Université de Perpignan-Via Domitia, 52 Av. Paul Alduy, 66860 Perpignan

³DGA, Odeillo, 66125, Font Romeu

* (auteur correspondant : antoine.boubault@promes.cnrs.fr)

Résumé - Dans le but de déterminer les paramètres responsables du vieillissement d'un matériau bicouche soumis à haut flux solaire, un modèle 2D axisymétrique reproduisant son comportement thermique a été développé. Diverses simulations ont été effectuées dans différentes configurations de conditions aux limites. Après différents traitements solaires entraînant le vieillissement accéléré du matériau, l'évolution de ses propriétés thermophysiques sera suivie par méthode photothermique impulsioneuse couplée à un algorithme des méthodes inverses. La comparaison de plusieurs algorithmes nous a permis de retenir la méthode de Levenberg-Marquardt.

Nomenclature

h	coefficient de convection, W/m^2K	ϕ	densité de flux incident, W/m^2
R_{tc}	résistance thermique de contact peinture/métal, m^2K/W	ε	émissivité de la face avant
T	température, K	σ	constante de Stefan-Boltzmann
$diffu$	diffusivité, m^2/s	β	vecteur des paramètres à identifier
$effu$	effusivité, $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$	<i>Indices et exposants</i>	
e	épaisseur	<i>front</i>	avant
I	matrice identité	<i>back</i>	arrière
X	matrice de sensibilité	<i>side</i>	latéral
r	vecteur des résidus	<i>incident</i>	incident
<i>Symboles grecs</i>		<i>émis</i>	émis
		0	initial

1. Introduction

Les récepteurs solaires utilisés dans le CSP (Concentrated Solar Power) subissent des agressions thermiques intenses et cycliques. Bien qu'ils soient principalement composés de matériaux très résistants comme les alliages réfractaires ou les céramiques, les conditions extrêmes dans lesquelles ils fonctionnent sont responsables de la dégradation prématurée de leurs performances thermiques et mécaniques. En particulier, leur capacité à absorber de façon optimale l'énergie solaire pour la transmettre au fluide de travail s'en retrouve affectée. C'est l'évolution de certaines propriétés du matériau, au cours du temps, qui en est responsable. Il devient alors nécessaire de déterminer quelles sont ces propriétés, et de quantifier leur impact sur les performances thermiques des récepteurs. En amont d'un dispositif expérimental, un modèle numérique s'avère être un outil indispensable pour étudier l'influence de l'évolution d'un paramètre donné sur le champ de température et les gradients thermiques au sein du matériau. Il permet de faire varier le type d'irradiation et les conditions aux limites du matériau pour déterminer les grandeurs ayant un rôle prépondérant dans son vieillissement.

Ce travail présente, dans une première partie, un modèle 2D axisymétrique, permettant de simuler le comportement thermique, en régime permanent, d'un matériau bicouche (métal+peinture absorbante) soumis à haut flux solaire. Une configuration dite « de référence » et trois autres configurations de conditions aux limites plus sévères sont présentées et analysées. Elles permettront de définir différentes conditions d'irradiation du matériau pour simuler des contraintes thermiques diverses et favoriser la dégradation accélérée du matériau.

Après différents cycles d'irradiation du matériau à l'aide d'un four solaire de 2 kW, une méthode photothermique impulsionnelle (méthode "flash"), couplée à un algorithme de résolution des problèmes inverses, sera utilisée pour suivre l'évolution des propriétés thermophysiques du matériau bicouche (diffusivité, effusivité, résistance thermique de contact peinture/métal). C'est dans une deuxième partie que nous présentons la méthode "flash", et comparons les performances de deux algorithmes : Box-Kanemasu et Levenberg-Marquardt. Le suivi de l'évolution de ces propriétés permettra de déceler l'éventuelle apparition de défauts, comme des fissures ou des délaminations, témoignant ainsi du vieillissement du matériau.

2. Simulation du comportement thermique d'un matériau bicouche

Nous avons sélectionné un matériau métallique (Inconel 625) revêtu d'une peinture absorbante (Pyromark 2500) constituant l'absorbeur-échangeur tubulaire des récepteurs solaires couramment utilisés dans les centrales solaires à tour [3]. Ces deux matériaux résistent aux fortes températures (respectivement jusqu'à 1500 K et 1300 K) et à l'oxydation. Certaines de leurs propriétés sont données par les fabricants ou dans la littérature [1], [2].

Nous avons caractérisé les épaisseurs de métal et de peinture d'un échantillon de tube, au microscope électronique à balayage (MEB). Nous en avons déduit la géométrie de l'échantillon à modéliser, à savoir un disque métallique de 1 mm d'épaisseur, de diamètre 2,5 cm, recouvert de 15 μm de peinture.

Le code de simulation utilisé est le logiciel FLUENT. La couche de peinture étant très fine par rapport à la couche de métal (rapport 0,015), nous avons raffiné le maillage dans cette zone (voir Figure 1).

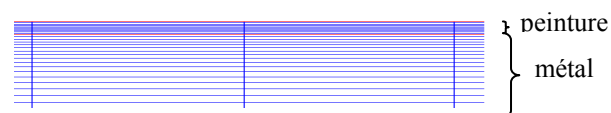


Figure 1: Maillage des couches de peinture et métal.

Pour diminuer les temps de calculs et simplifier la représentation des résultats, nous choisissons d'utiliser une géométrie 2D axisymétrique (Figure 2).

Pour une meilleure visualisation des résultats, nous représentons les profils de température le long de 3 segments verticaux (centre, milieu, bord) et de 4 segments horizontaux (bas, milieu, interface, haut). Dans cet article, seuls deux résultats typiques sont décrits. Ils ne nécessitent, pour leur représentation, que les segments *vertical_centre* et *horizontal_haut*, schématisés sur la Figure 2.

2.1. Quatre configurations de conditions aux limites

La configuration de référence se base sur les données nominales de fonctionnement d'un récepteur solaire à tubes [3]. Les trois autres configurations correspondent aux conditions de travail plus sévères qui pourront être appliquées en laboratoire, afin d'accélérer le

vieillessement du matériau. La Figure 3 et le Tableau 1 récapitulent les différentes conditions aux limites, dans chaque configuration.

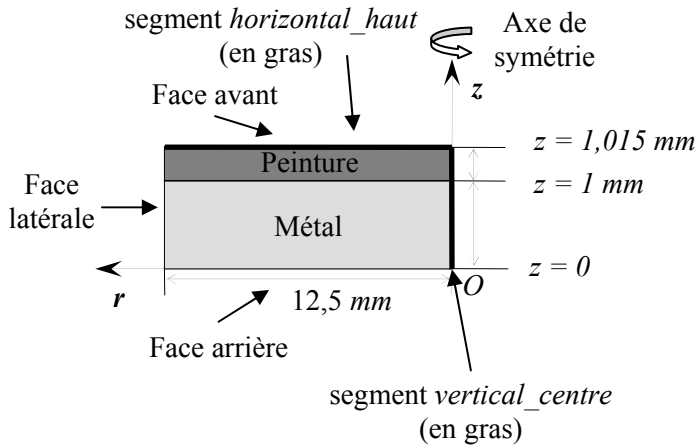


Figure 2 : Schéma de l'échantillon étudié (échelle non respectée)

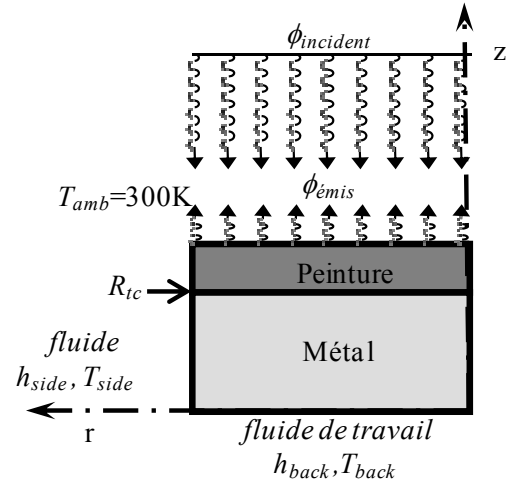


Figure 3 : Schéma des conditions aux limites applicables

Configuration	Face avant	Face arrière	Face latérale	Interface
Référence	$\phi_{incident} = 150 \text{ kW/m}^2$	$h_{back} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T_{back} = 1073 \text{ K}$	isolée	R_{tc} modulable
n°1	$\phi_{incident}$ modulable	isolée	isolée	$R_{tc} = 0$
n°2	$\phi_{incident}$ modulable	h_{back} modulable $T_{back} = 300 \text{ K}$	isolée	R_{tc} modulable
n°3	$\phi_{incident}$ modulable	isolée	h_{side} modulable $T_{side} = 300 \text{ K}$	R_{tc} modulable

Tableau 1 : Conditions aux limites appliquées selon la configuration et la frontière considérée

La densité de flux émis par la face avant est définie comme suit :

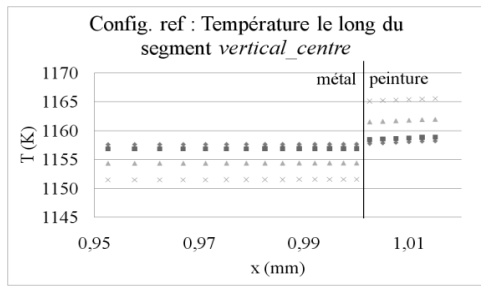
$$\phi_{emis} = \varepsilon \sigma T_{front}^4 \quad (1)$$

L'émissivité ε est considérée constante et égale à 0,9 [2]. Le rayonnement des autres faces n'est pas pris en compte.

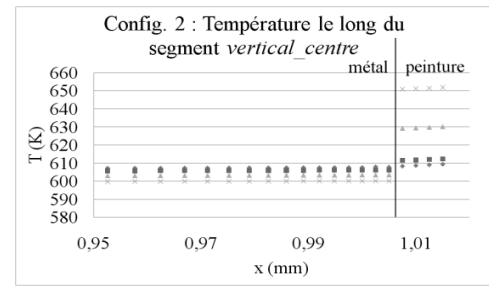
2.2. Résultats

2.2.1. Influence de la résistance thermique de contact peinture/métal dans la configuration de référence et dans la configuration n°2

Le champ de température est calculé pour quatre valeurs de la résistance thermique de contact peinture/métal : $R_{tc} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_{tc} = 4,13 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_{tc} = 2,07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ et $R_{tc} = 4,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$. Dans la configuration n°2, qui est un cas général de la configuration de référence, la surface latérale est isolée. La température du fluide de travail est quant à elle de 300 K au lieu de 1073 K. En considérant un flux incident uniforme de densité 150 kW/m^2 , la température ne varie que dans la direction x . Nous représentons donc la température uniquement selon le segment *vertical_centre*, en effectuant un zoom près de l'interface métal/peinture (de $x = 0,95 \text{ mm}$ à $x = 1,015 \text{ mm}$) pour une meilleure visualisation des sauts de température.



(a)



(b)

Figure 4 : Température le long du segment `vertical_centre` pour quatre valeurs de la résistance thermique de contact peinture/métal - (a) : Configuration de référence (b) : Configuration n°2

Sur la Figure 4(a), on observe que l'augmentation de la résistance thermique de contact peinture/métal induit une température plus basse du côté métal, et plus haute du côté peinture, par rapport au cas du contact parfait ($R_{tc} = 0$). Dans la configuration 2 (Figure 4(b)), les températures sont plus basses car la température du fluide de travail est elle aussi abaissée à 300 K, contre 1073 K pour le cas de référence. On constate en revanche que les écarts de température de part et d'autre de l'interface peinture/métal sont plus forts (jusqu'à quatre fois ceux du cas de référence).

Ceci nous montre qu'il est possible d'augmenter les gradients de température verticaux dans la pièce en abaissant la température de refroidissement en face arrière, pour générer la dégradation accélérée du matériau (fissures ou délaminations de la peinture).

2.2.2. Influence d'une distribution gaussienne du flux incident, dans la configuration n°3

Cette configuration prend en compte un échange de chaleur par convection sur la face latérale de l'échantillon ($h_{side} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{side} = 300 \text{ K}$) générant un gradient de température radial (dans la direction r). Les champs de température sont obtenus pour trois distributions du flux solaire (suivant une loi normale gaussienne), de moyennes respectives : $\phi_{incident} = 50 \text{ kW/m}^2$, $\phi_{incident} = 150 \text{ kW/m}^2$, et $\phi_{incident} = 300 \text{ kW/m}^2$, en considérant, dans ce cas, une résistance de contact peinture/métal nulle.

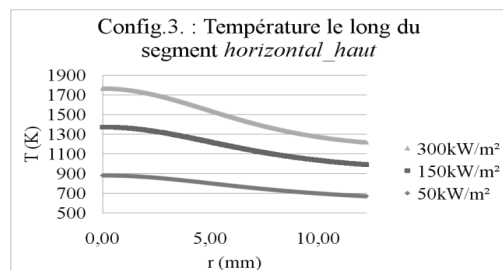


Figure 5 : Configuration n°3 - Température le long du segment `horizontal_haut`

$\phi_{incident}$ kW/m ²	Gradient radial (K/mm)
50	17
150	31
300	45

Tableau 2: Configuration n°3 - Gradient de température radial sur le segment `horizontal_haut`

On observe, sur la Figure 5, que les températures sont plus fortes au centre de l'échantillon que sur ses côtés : l'écart de température atteint 550 K dans le cas $\phi_{incident} = 300 \text{ kW/m}^2$.

Le Tableau 2 nous montre les valeurs du gradient thermique de surface entre le centre de l'échantillon et son pourtour, pour chaque valeur du flux incident. On cherchera à maximiser ce gradient tout en évitant la fusion du matériau due à la non-homogénéité du flux, comme dans le cas précédent où la température atteint 1770 K au centre de la pièce.

Des simulations supplémentaires en régimes permanent et transitoire ont permis de définir les conditions optimales d'irradiation, pour modifier significativement les champs de température, en vue de réaliser des tests de vieillissement accélérés.

Après le traitement solaire des matériaux, les propriétés optiques de surface et les propriétés thermophysiques du matériau seront mesurées et analysées pour relier leur évolution aux phénomènes de vieillissement. Les algorithmes présentés dans la partie suivante, permettent, à partir d'une méthode photothermique impulsionnelle, d'identifier numériquement ces propriétés thermophysiques.

3. Etude comparative de deux algorithmes de résolution des problèmes inverses : Box-Kanemasu (BK) et Levenberg-Marquardt (LM).

Un changement des propriétés internes telles que la diffusivité, l'effusivité ou la résistance de contact du matériau bicouche, peut révéler une modification de la structure (apparition de fissures, décollement, etc.), témoignant ainsi de son vieillissement. Ces grandeurs sont estimables par techniques inverses. La mise en œuvre de ces techniques nécessite de disposer de mesures expérimentales. Dans notre cas elles sont obtenues par la méthode photothermique impulsionnelle (Figure 6).

3.1. Méthode photothermique impulsionnelle et techniques inverses

Cette méthode consiste à mesurer la réponse en température d'un matériau à une excitation thermique impulsionnelle (laser), puis de la comparer à la réponse obtenue par modélisation théorique du problème.

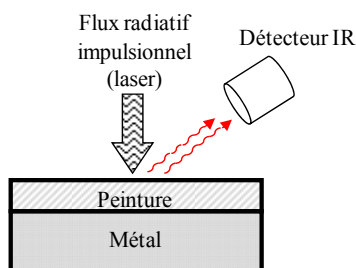


Figure 6 : Schéma du principe de la méthode photothermique impulsionnelle

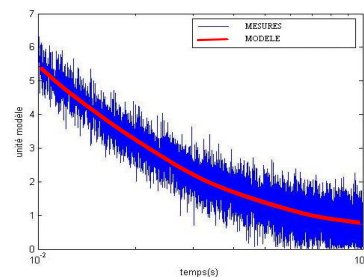


Figure 7 : Réponse temporelle bruitée en face avant du matériau (bleu) et modèle (rouge)

Les paramètres du modèle sont ajustés itérativement, jusqu'à ce que la réponse théorique soit la plus proche possible de la réponse expérimentale (Figure 7). On a alors une estimation des propriétés que l'on cherche : c'est le principe des techniques inverses (Figure 8) [4].

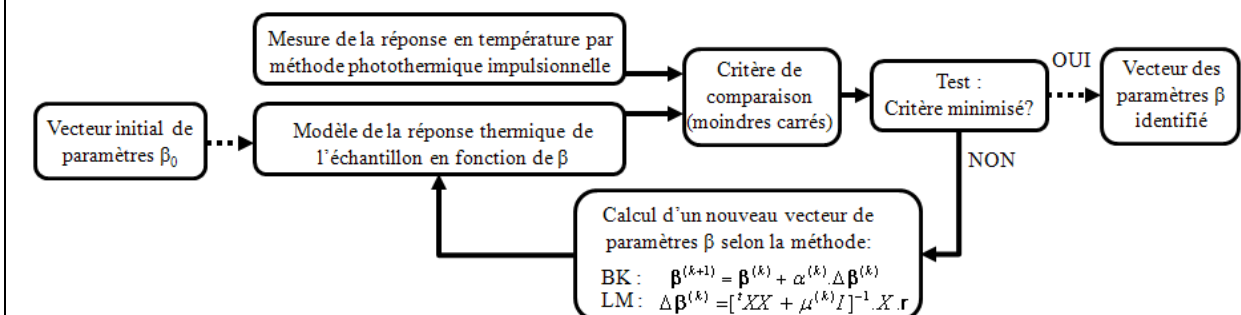


Figure 8 : Schéma du principe de fonctionnement des méthodes inverses, et calcul du nouveau vecteur des paramètres β selon la méthode Box-Kanemasu (BK) et Levenberg-Marquardt (LM)

A partir d'un vecteur initial de paramètres β_0 permettant de calculer les valeurs initiales du modèle, on cherche à minimiser un critère de comparaison (moindres carrés), en recalculant, à chaque itération, le jeu de paramètres $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3) = (effu_{peint} / effu_{metal}, diffu_{peint} / e_{peint}^2, R_{tc} \cdot effu_{peint})$, suivant la méthode de Box-Kanemasu ou de Levenberg-Marquardt [5] (Figure 8).

Remarque : $\alpha^{(k)}$ et $\mu^{(k)}$ sont des coefficients d'ajustement du pas d'itération $\Delta \beta^{(k)}$.

3.2. Résultats

Nous avons procédé à différents tests pour comparer les performances de ces deux méthodes. Nous n'en présentons ici qu'un seul : à partir de réponses expérimentales bruitées (bruit d'écart-type : 10% de la valeur moyenne du signal), nous avons réalisé dix tests de convergence avec chacune des deux méthodes (Tableau 3 et Tableau 4)

bruit : 10%					bruit : 10%				
Calcul n°	Box-Kanemasu				Calcul n°	Levenberg-Marquardt			
	Erreur max. sur modèle	Erreur sur β_1	Erreur sur β_2	Erreur sur β_3		Erreur max. sur modèle	Erreur sur β_1	Erreur sur β_2	Erreur sur β_3
1	0.74	0.00	0.00	0.01	1	0.82	0.00	0.01	0.02
2	0.72	0.02	0.10	0.30	2	0.85	0.02	0.09	0.21
3	0.78	0.00	0.03	0.10	3	0.83	0.01	0.05	0.15
4	0.74	0.01	0.06	0.20	4	0.74	0.02	0.10	0.25
5	0.76	0.01	0.13	0.45	5	0.74	0.00	0.03	0.08
6	0.73	0.01	0.11	0.30	6	0.77	0.00	0.00	0.02
7	0.95	0.01	0.08	0.25	7	0.83	0.01	0.02	0.04
8	0.82	0.00	0.03	0.09	8	0.95	0.00	0.01	0.04
9	0.73	0.01	0.07	0.20	9	0.81	0.00	0.03	0.09
10	0.71	0.00	0.06	0.20	10	0.76	0.00	0.03	0.13
Moyenne	0.77	0.01	0.07	0.21	Moyenne	0.81	0.01	0.04	0.10

Tableau 3 et Tableau 4 : Erreurs sur les paramètres β_1 , β_2 , et β_3 pour 10 identifications avec des modèles bruités à 10%, selon BK (à gauche) et LM (à droite)

Dans les deux cas, le paramètre β_3 est identifié avec moins de précision que les autres. Les erreurs d'estimation commises par la méthode de Levenberg-Marquardt sont globalement moins importantes que celles commises par celle de Box-Kanemasu.

D'autres tests ont montré que la méthode de Levenberg-Marquardt permet d'obtenir la convergence à partir d'une plus grande variété de vecteurs initiaux, ce qui en fait une méthode plus robuste. Elle nous semble donc être un meilleur candidat pour l'estimation des propriétés thermophysiques du matériau bicouche.

4. Conclusion

Grâce à un modèle numérique 2D-axisymétrique, nous avons étudié le rôle de plusieurs paramètres sur le comportement thermique d'un matériau bicouche. En modifiant les conditions de traitement thermique (irradiation, conditions aux limites, etc.), il est possible d'augmenter les contraintes au sein du matériau. Des simulations en régime transitoire sont en cours de réalisation afin de définir les expérimentations solaires à mener (cycles d'irradiation, chocs thermiques) pour vieillir le matériau de manière accélérée.

Une méthode photothermique impulsionnelle sera mise en place pour suivre l'évolution des propriétés thermophysiques du matériau, y compris la résistance de contact. L'algorithme d'identification de Levenberg-Marquardt, plus robuste et plus précis que l'algorithme de Box-Kanemasu, a été sélectionné pour procéder à l'estimation de ces propriétés.

Références

- [1] Y.S. Touloukian, Thermophysical Properties of Matter - Thermal Radiative Properties - Coatings, John Wiley and Sons Ltd, 1973.
- [2] <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>.
- [3] L. Amsbeck, R. Buck, P. Heller, J. Jedamski, R. Uhlig, Development of a tube receiver for a solar-hybrid microturbine system, Solarpaces 2008, March 4-7, Las Vegas, USA.
- [4] O. Faugeron, Caractérisation thermophysique de revêtement de protection thermomécanique par méthode photothermique impulsionnelle, Thèse de doctorat, Université de Perpignan, déc. 2001.
- [5] J.V. Beck and K.J. Arnold, Parameters Estimation in Engineering and Sciences, Wiley, New York, 1977.