

Etude expérimentale, modélisation et identification de la diffusivité thermique de peintures intumescentes.

Mathieu GILLET¹, Laetitia PEREZ², Laurent AUTRIQUE^{1,3}, Jean-Jacques SERRA^{1,*}

¹DGA/EHF

BP 59, 66121 Font-Romeu Cedex, France

Tel : (+33) 468 307 676

²Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, UMR CNRS 6607

Rue Christian Pauc, BP 50609, 44306 Nantes Cedex 3, France

³IUP-GSI, Faculté des Sciences, Université de Perpignan,

52 av. P. Alduy, 66860 Perpignan, France

Tel : (+33) 468 682 251

* (auteur correspondant : jean-jacques.serra@dga.defense.gouv.fr)

Résumé - Les systèmes de protection actifs tels que les peintures intumescentes représentent une solution efficace pour protéger les matériels et personnels militaires engagés en combat. Une étude expérimentale de ces revêtements est présentée, ainsi que la démarche d'identification de leur diffusivité thermique. Les résultats obtenus ont permis de développer et de valider un modèle mathématique décrivant le comportement des revêtements intumescents sous différents types d'agressions.

Nomenclature

C_p	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs :</i>	
t	Temps, s	ϕ	Flux excitateur, W
x, y, z	Variables d'espace, m	θ	Température, K
e	Epaisseur, m	$\tilde{\theta}$	Température complexe, K
h	Coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
		ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
		α	Diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
		φ	Phase de l'onde, $^\circ$

1. Introduction

Les revêtements intumescents sont des systèmes actifs de protection incendie, présentant la propriété de gonfler lorsqu'ils sont soumis à une agression thermique importante. Le résultat de ce gonflement (phénomène d'intumescence) est l'apparition d'un épais système multicouche isolant, permettant d'assurer la protection thermique de la surface revêtue. Dans le cadre d'une problématique défense, les revêtements intumescents ont l'avantage de combiner une facilité d'application, un encombrement réduit et une efficacité importante. Ces caractéristiques répondent aux exigences militaires en matière de protection incendie, et permettent d'envisager l'utilisation de peintures intumescentes pour une vaste gamme de matériels (véhicules, bâtiments, équipement du combattant, munitions et armes, etc.). La composition chimique des peintures ainsi que le phénomène d'intumescence sont détaillés dans [1].

La réaction d'un système intumescent sous agression thermique peut, en première approche, être décomposée en différentes étapes suivant le schéma représenté sur la figure 1. La photographie est une coupe du système en fin de réaction.

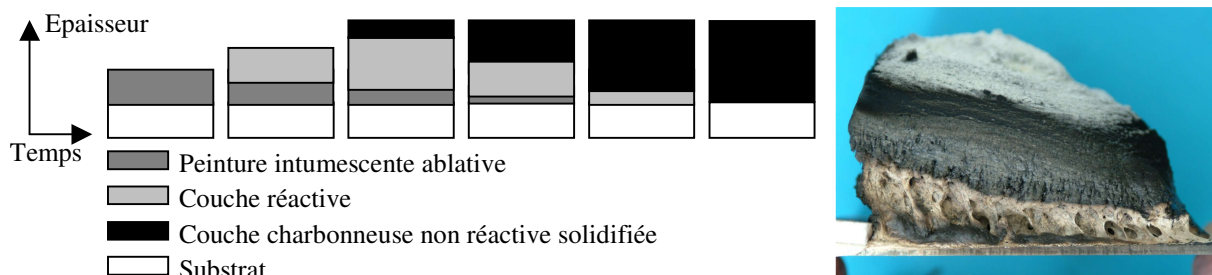


Figure 1 : Evolution de la structure du système lors d'une agression – état final

2. Etude expérimentale sous haut flux

La pertinence de la protection intumescente pour des éléments sensibles tels que des réservoirs de carburant ou des coques de protection pour missiles a été démontrée dans des configurations diverses (incendies et explosions de type BLEVE [2]).

2.1 Dispositif expérimental

Le protocole expérimental ainsi le moyen d'essai employé (le Four Solaire Principal du laboratoire EHF de la DGA) sont détaillés dans [3]. Ce dispositif permet de soumettre des plaques d'acier recouvertes de différentes épaisseurs de peinture intumescente à des agressions thermiques représentatives d'incendies ou d'explosions, et de mesurer l'évolution de la température sur la face non irradiée ainsi que la perte de masse.

2.2 Caractérisation de l'efficacité sous hauts flux

L'efficacité protectrice des peintures intumescentes est présentée ici à travers l'étude d'un exemple représentatif : un réservoir de carburant. La protection d'un tel réservoir consiste à appliquer de la peinture intumescente sur ses faces externes afin de maintenir une température basse en cas d'agression sur les faces internes en contact avec le carburant. Deux plaques d'acier identiques sont testées sous un flux de 170 kW.m^{-2} , l'une d'elles étant recouverte par 1 mm de peinture intumescente. On considère dans cette configuration la température de réaction des propergols (540 K) comme température critique à ne pas dépasser sur la face arrière. Les thermogrammes obtenus respectivement pour la plaque non protégée et pour la plaque équipée de peinture sont présentés sur les figures 1 et 2.

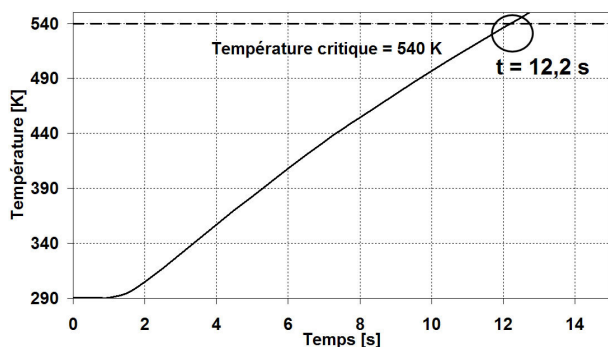


Figure 1 : Température de la face arrière d'une plaque non protégée

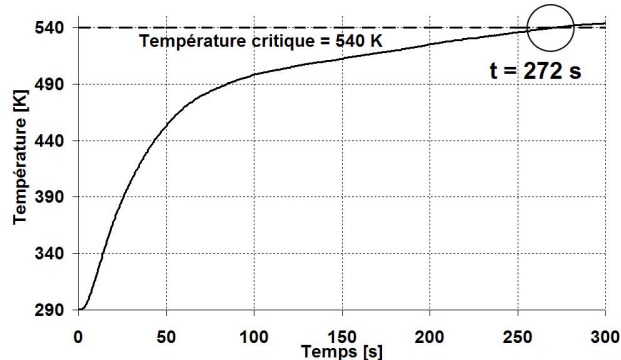


Figure 2 : Température de la face arrière d'une plaque protégée

L'observation de ces thermogrammes montre la capacité d'une mince couche de peinture intumescente à retarder l'apparition de la température critique sur la face non protégée de la plaque permettant ainsi l'intervention des services de sécurité. Lors de ces essais, l'épaisseur de la couche de peinture a atteint environ 5 cm en 270 secondes, soit 50 fois son épaisseur initiale.

3. Modélisation du phénomène d'intumescence sous hauts flux

Le modèle mathématique, basé sur la résolution numérique par la méthode des différences finies d'un système d'équations aux dérivées partielles, est présenté en détail ainsi que les types d'agressions considérés dans [4]. La comparaison des résultats simulés numériquement avec les mesures expérimentales permet de valider la structure du modèle. Les figures 3 et 4 ci-dessous présentent les comparaisons obtenues respectivement dans le cas d'une agression de type BLEVE et dans le cas d'un incendie.

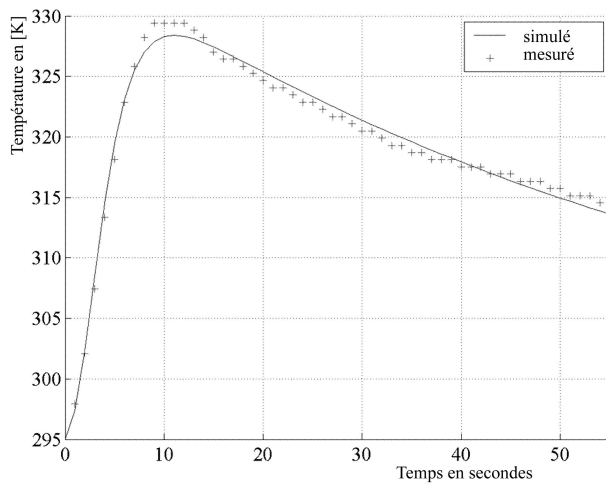


Figure 3 : Température de la face arrière d'une plaque soumise à une BLEVE

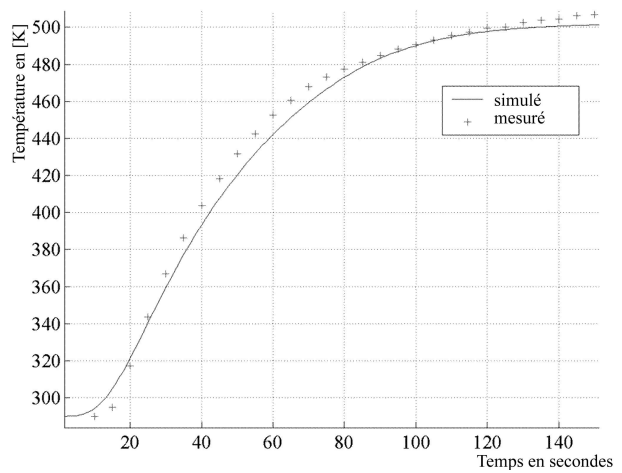


Figure 4 : Température de la face arrière d'une plaque soumise à un incendie

Ces figures, si elles semblent valider la pertinence de l'approche de modélisation retenue (en particulier la structure du modèle), mettent néanmoins en évidence certains écarts. Ces imprécisions de calcul du modèle provenant d'une connaissance trop approximative de certaines caractéristiques de la peinture intumescente, une campagne d'identification paramétrique est menée.

4. Identification de la diffusivité thermique de la peinture vierge

Une méthode périodique inverse est employée pour identifier la diffusivité thermique de la peinture vierge sèche, libre de tout substrat [5]. D'une part, un modèle mathématique décrivant la propagation d'une onde thermique sinusoïdale au sein d'un échantillon de peinture est mis au point. D'autre part, des campagnes expérimentales permettant la mesure des déphasages entre le signal excitateur périodique et les variations de température sur la face opposée de l'échantillon de peinture ont été réalisées. La minimisation de l'écart entre les déphasages calculés par le modèle et ceux mesurés expérimentalement permet d'identifier la diffusivité thermique de la peinture.

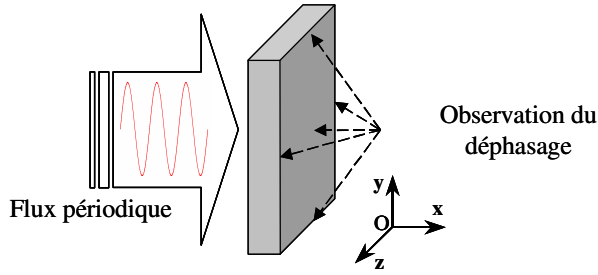


Figure 5 : Schéma de principe

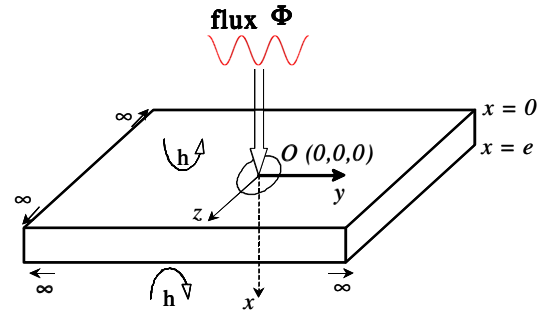


Figure 6 : Géométrie du problème direct

4.1 Modélisation de la propagation d'une onde sinusoïdale au sein d'un matériau

Considérons un matériau Ω plan d'épaisseur e dont une face ($\Gamma_0 = \{X = (0, y, z) \in \Omega \subset \mathbb{R}^3\}$) est soumise à un flux de chaleur sinusoïdal de période ω centré en $O = (0, 0, 0)$, la face opposée ($\Gamma_e = \{X = (e, y, z) \in \Omega\}$) subissant des pertes d'origine convective (voir figure 6). Les dimensions du domaine d'étude sont choisies de manière à négliger les pertes latérales. Les transferts thermiques sont décrits par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C p \frac{\partial \theta(X, t)}{\partial t} - \text{div} \left(-\lambda \overline{\text{grad} \theta(X, t)} \right) = 0 \quad \forall (X, t) \in \Omega \times T \\ \lambda \frac{\partial \theta(X, t)}{\partial x} = h \theta(X, t) - \phi \cos(\omega t) \quad \forall (X, t) \in \Gamma_0 \times T \\ -\lambda \frac{\partial \theta(X, t)}{\partial x} = h \theta(X, t) \quad \forall (X, t) \in \Gamma_e \times T \\ \theta(X, 0) = 0 \quad \forall X \in \Omega \end{array} \right. \quad (1)$$

La phase théorique de l'onde thermique est déterminée en considérant la température complexe $\tilde{\theta}(X; \varphi) = M(X) e^{j\varphi}$, qui permet de réécrire le système de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} j\omega \rho C p \tilde{\theta} - \text{div} \left(-\lambda \overline{\text{grad} \tilde{\theta}} \right) = 0 \quad \forall X \in \Omega \\ \lambda \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} = h \tilde{\theta} - \phi \quad \forall X \in \Gamma_0 \\ -\lambda \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} = h \tilde{\theta} \quad \forall X \in \Gamma_e \end{array} \right. \quad (2)$$

En considérant la transformée de Fourier de $\tilde{\theta}$ et en introduisant le nombre de Biot $\text{Bi} = \frac{he}{\lambda}$, le système est résolu grâce à Matlab[®]. La transformée de Fourier inverse de la solution permet ensuite de tracer l'évolution des déphasages en fonction de la fréquence d'excitation (vobulation) ou d'une composante spatiale (balayage spatial).

4.2 Etude expérimentale

La figure 7 ci-dessous présente les éléments du dispositif expérimental utilisé pour mesurer les déphasages.

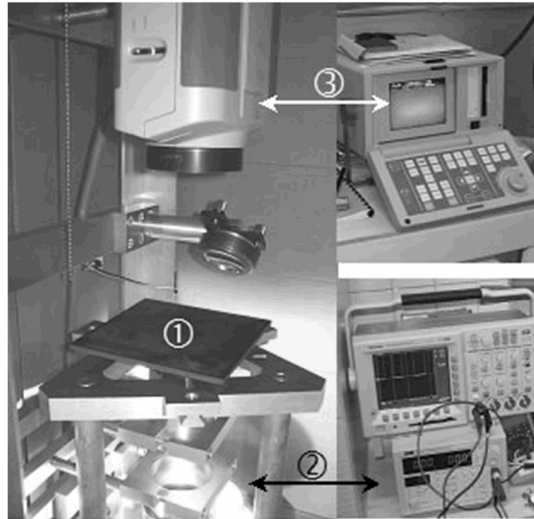


Figure 7 : Montage expérimental

L'échantillon (1) est disposé de façon à ce que sa face inférieure soit exposée à une excitation modulée (2), dont la distribution spatiale est homogénéisée par un dispositif optique de Köhler. La mesure de la température sur la face supérieure de l'échantillon est réalisée en continu par une caméra IR (3). Les déphasages sont ensuite calculés grâce à un algorithme à détection synchrone.

4.3 Résultats de l'identification

Les images fournies par la caméra IR permettent de calculer (à l'aide d'un algorithme de détection synchrone) l'amplitude de l'onde thermique atteignant la face supérieure de l'échantillon (module) ainsi que le retard de cette onde sur le signal excitateur (déphasage). Ces deux grandeurs peuvent être représentées de la façon suivante :

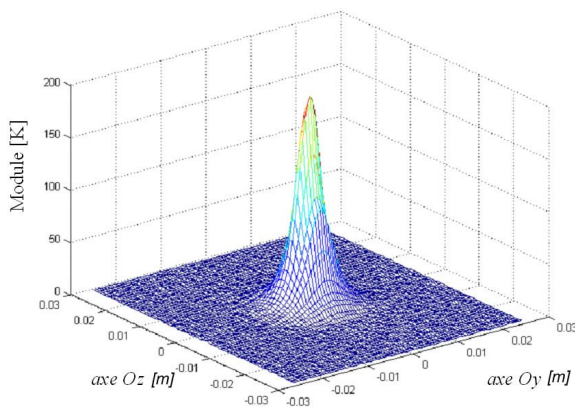


Figure 8 : Distribution spatiale du module

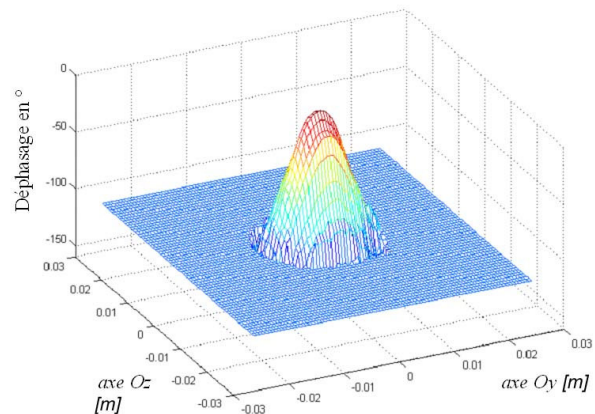


Figure 9 : Distribution spatiale du déphasage

En comparant les déphasages prédits par le modèle semi analytique (transformée de Fourier inverse) aux mesures de déphasage selon un des axes (Oy par exemple) grâce à l'algorithme de minimisation de Levenberg-Marquardt, la diffusivité thermique de la peinture intumescence vierge est identifiée. Celle-ci a été estimée à $\frac{\lambda}{\rho C_p} \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \pm 15\%$. Les déphasages mesurés et calculés après convergence de l'algorithme de minimisation sont montrés figure 10.

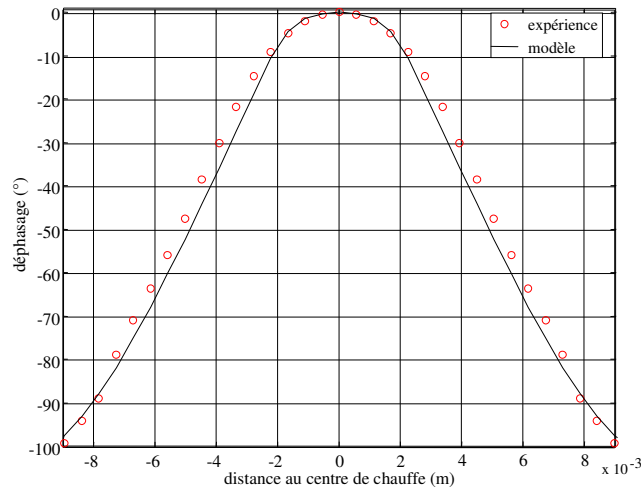


Figure 10 : Comparaison entre déphasages expérimentaux et calculés

5. Conclusion et perspectives

L'intérêt des peintures intumescentes en tant que dispositif de protection contre les agressions thermiques dans un contexte militaire a été démontré à travers l'étude de leur efficacité.

Le modèle mathématique permettant notamment de décrire les transferts thermiques dans un système plaque / peinture a été validé. Son amélioration dépendant fortement de la précision des paramètres utilisés en entrée (principalement les caractéristiques thermiques de la peinture), une campagne d'identification reposant sur une méthode périodique inverse a été mise au point.

La diffusivité thermique de la peinture intumescente a été identifiée, le résultat obtenu présentant une valeur satisfaisante ($5.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) dans la mesure où elle appartient à la gamme attendue pour un matériau isolant.

La poursuite de cette étude est actuellement en cours en utilisant le Four Solaire Principal comme source d'une excitation périodique pour l'identification de la diffusivité thermique de la couche carbonneuse, qui représente le stade final de la réaction d'intumescence.

Références :

- [1] C. Di Blasi, C. Branca, Mathematical model for the nonsteady decomposition of intumescent coatings, *AIChE Journal*, Vol 47, n°10, (2001), 2359-2370.
- [2] M. Gillet, L. Autrique, L. Perez, J-J. Serra, Validation d'un modèle prédictif pour le comportement de matériels militaires soumis à de hauts flux thermiques, *Congrès SFT 2006*, 16-19 mai 2006.
- [3] L. Autrique, M. Gillet, L. Perez, Le four solaire principal : un démonstrateur pour l'expertise. *Journées démonstrateurs en Automatique, JESA Angers*, 28 - 29 mars 2006.
- [4] M. Gillet, L. Autrique, L. Perez, Mathematical model for intumescent coatings growth: application to fire retardant systems evaluation, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** (2007) 883-899.
- [5] Alifanov O.M., *Inverse Heat Transfer Problems*, pp. 348, Springer-Verlag, 1994.