

Etude de l'influence des propriétés radiatives des peintures et des lampes infrarouge sur la cuisson des peintures en poudre.

Isabelle BOMBARD¹, Pierre LAURENT^{1*}, Gérard JEANDEL², Joseph LIETO¹

¹ Université Lyon 1, Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés (LAGEP) ; CNRS UMR 5007 ; ESCPE Lyon ; 43 boulevard du 11 Nov. 1918 ; Villeurbanne ; F-69622, France

² Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), UMR CNRS 7563, Faculté des Sciences et Techniques, BP 239, 54506 Vandoeuvre Cedex.

* (auteur correspondant : laurent@lagep.univ-lyon1.fr)

Résumé - Cette étude numérique porte sur la modélisation du procédé de cuisson radiatif des peintures en poudre. La mesure de la réflectance de peintures thermodurcissables à l'état poudre ou cuit a permis le calcul de leurs propriétés radiatives (émissivité, absorptivité) et l'implémentation de ces dernières dans un modèle de cuisson. L'émittance des émetteurs infrarouge, approximée par celle du corps noir dans un premier temps, puis comparée à l'émittance réelle des sources IR a par ailleurs montré une surestimation des températures de cuisson calculées non négligeables.

Nomenclature

A	facteur pré-exponentiel,	ε	émissivité
C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	ϕ	flux radiatif, $W.m^{-2}$
e	épaisseur, m	λ	longueur d'onde, μm
E	énergie d'activation, $J.mol^{-1}$	λ_c	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
h	coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	ρ^*	réflectance
T	température, K	σ	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$
R	constante des gaz parfaits, $J.mol^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
x	degré de conversion	m, n	paramètres cinétiques
<i>Symboles grecs</i>		p, s	peinture, support
α	absorptivité		

1. Introduction

L'utilisation des peintures en poudre est actuellement un des meilleurs moyens de peinture pour faire face aux normes environnementales de plus en plus strictes, car ces peintures, ne contiennent pas de COV (Composés Organiques Volatils). A la suite de travaux sur la cuisson sous infrarouge électrique de deux types de poudres thermodurcissables [1] nous nous sommes intéressés à l'influence des propriétés radiatives des peintures et des sources infrarouges utilisées sur les températures de cuisson des poudres.

2. Etude expérimentale

2.1. Matériel

Deux types de peintures sont utilisés, chacune en deux couleurs (noir et blanc). Elles sont toutes deux thermodurcissables, mais destinées à des applications différentes : la peinture de type A est bien adaptée à un chauffage par infrarouge, tandis que la peinture de type B est une peinture classique adaptée aux cuissons par convection "boostées" par infrarouge.

L'application de la poudre se fait sur des panneaux standards Q-PANEL de dimension 76 x 127 x 0,8 mm³ à l'aide d'un pistolet électrostatique à décharge Corona Gema C1.

2.2. Cuissons expérimentales

Le banc infrarouge utilisé dans cette étude a déjà été décrit précédemment [1]. Le Tableau 1 reprend les caractéristiques nominales des émetteurs infrarouges utilisés. L'installation permet de recueillir les températures expérimentales de cuisson (voir courbe A-exp, Figure 3).

Type de lampe PHILIPS	Abréviation	Voltage (V)	Température du filament (K)	Pic d'émission (µm)	Puissance (W)
IR Moyen sous volté	IRM SV	140	1450	2,00	9x450
IR Moyen	IRM	235	1750	1,66	9x1000
IR court sous volté	IRC SV	181,9	2275	1,27	9x675
IR Court	IRC	235	2500	1,16	9x1000
IR proche sous volté	NIR SV	175	2650	1,09	9x950
IR proche	NIR	235	2950 K	0,98	9x1500

Tableau 1 : Caractéristiques des émetteurs infrarouges

2.3. Mesures de réflectance

L'appareillage utilisé pour mesurer la réflectance directionnelle hémisphérique totale des peintures étudiées est constitué d'un spectromètre infrarouge à Transformée de Fourier de marque Bruker IFS 66vs et d'une sphère intégrante de substitution. Le spectromètre FTIR est équipé d'une source Globar, d'une séparatrice KBr, et d'un détecteur externe MCT (Mercure Cadmium Telluride) refroidi à l'azote liquide. La plage de longueur d'onde de travail est 1,4 – 12 µm. La surface interne de la sphère intégrante est recouverte d'un revêtement diffusant 'Infragold' de coefficient de réflexion de 0,9865.

Les mesures de réflectance spectrale sont réalisées statiquement sur des peintures à l'état poudre et sur des peintures cuites (avec, dans ce cas, une mesure réalisée à la température ambiante et une à 190 °C), et en mode dynamique, pendant la phase de cuisson.

Pour ces mesures, les peintures sont déposées sur le même support en acier que celui utilisé lors des cuissons expérimentales dans le four. La sphère est disposée de telle façon que le port de référence/mesure est situé en dessous de celle-ci ; les échantillons sont donc étudiés en position horizontale. Pour effectuer le suivi de la réflectance pendant la phase de cuisson, les échantillons de peinture en poudre déposés sur le support en acier sont déposés sur une plaque épaisse (11×5×1cm) en laiton équipée de deux cartouches chauffantes reliées elles-mêmes à une alimentation régulée. La température imposée par le support chauffant est enregistrée parallèlement aux mesures de réflectance.

3. Modèle de cuisson radiatif des peintures en poudre

3.1. Construction du Modèle A

3.1.1. Equation de la chaleur et cinétique de cuisson

La cuisson des peintures en poudre est régie par les lois de transferts de chaleur. Le modèle 1D de transferts thermiques consiste à intégrer numériquement l'équation de la chaleur écrite, dans chacun des milieux (support et peinture), sous la forme :

$$\nabla(\lambda_{c,s}\nabla T_s) = \rho_s C p_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad \text{et} \quad \nabla(\lambda_{c,p}\nabla T_p) = \rho_p C p_p \frac{\partial T_p}{\partial t} + Q_{reaction} \quad (1)$$

Où $Q_{réaction}$ ($W.m^{-2}$) correspond à la chaleur dégagée par la réaction exothermique de polymérisation. La cinétique de cuisson des poudres est décrite par le modèle de Šesták-Berggren [1] ce qui conduit à une expression de la forme :

$$Q_{reaction} = \rho_p e_p \Delta H_0 \frac{dx}{dt} = \rho_p e_p \Delta H_0 k(T) f(x) = \rho_p e_p \Delta H_0 A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) x^m (1-x)^n \quad (3)$$

3.1.2. Conditions initiales et limites au modèle

▪ Conditions initiales

$$T_p(z,0) = T_1, \quad T_s(z,0) = T_2 \quad \forall z \quad \text{et} \quad x(z,0) = 0^+ \quad \forall 0 \leq z \leq z_{interface}$$

▪ Conditions aux limites

$$-\lambda_{c,p} \frac{\partial T_p}{\partial z} = \phi_{abs} - \sigma \varepsilon_p (T_p^4 - T_\infty^4) - h_p (T_p - T_\infty) \quad \text{pour} \quad z = 0$$

$$-\lambda_{c,p} \frac{\partial T_p}{\partial z} = -\lambda_{c,s} \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad \text{et} \quad T_p = T_s \quad \text{pour} \quad z = z_{interface} = e_p$$

$$-\lambda_{c,s} \frac{\partial T_s}{\partial z} = \sigma \varepsilon_s (T_s^4 - T_\infty^4) + h_s (T_s - T_\infty) \quad \text{pour} \quad z = e_p + e_s$$

▪ Calcul de α_p et ε_p . Soient :

- ϕ_i ($W.m^{-2}$) le flux radiatif incident sur la surface supérieure de la peinture ; il est mesuré dans le plan de la peinture au moyen d'un fluxmètre Medtherm 64-2-20 et sa valeur expérimentale est constante (typiquement de $23,5 kW.m^{-2}$) puisque nous avons choisi de travailler à densité de flux constante afin de comparer les différents émetteurs infrarouges.

- ϕ_{em} ($W.m^{-2}$) le flux radiatif émis par l'émetteur infrarouge. Dans ce premier modèle, nous utilisons l'approximation du corps noir pour représenter le rayonnement des lampes infrarouges. ϕ_{em} est donc égal à σT_{em}^4 , T_{em} étant la température de l'émetteur infrarouge.

- $FF = \frac{\phi_i}{\phi_{em}}$ un facteur de forme expérimental entre l'émetteur IR et l'échantillon de peinture.

- $\rho_{p,\lambda}^*$ la réflectance des peintures poudre ou cuite mesurée par spectrométrie infrarouge FTIR entre deux bornes $\lambda_{inf} = 1,4 \mu m$ et $\lambda_{sup} = 12,5 \mu m$.

Pour obtenir α_p et ε_p nous faisons l'hypothèse que la peinture est opaque (transmissivité $\tau = 0$) donc $\rho_{p,\lambda}^* + \alpha_{p,\lambda} = 1$ et $\alpha_{p,\lambda} = \varepsilon_{p,\lambda}$.

Le flux absorbé par la peinture en provenance de l'émetteur IR à la température T_{em} est :

$$\phi_{abs} = FF \cdot \int_0^\infty \alpha_{p,\lambda} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{em}}\right) - 1} d\lambda = \alpha_p \phi_i \quad (5)$$

L'absorptivité moyenne sur le spectre α_p se déduit ensuite de l'expression (5).

Le flux émis par la peinture du fait de sa température de surface T_{surf} qui évolue au cours du temps est :

$$\phi_e = \int_0^{\infty} \varepsilon_{p,\lambda} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{surf}}\right) - 1} d\lambda = \varepsilon_p \sigma T_{surf}^4 \quad (7)$$

L'émissivité moyenne sur le spectre ε_p est directement déduite de l'expression (7).

3.2. Construction du Modèle B

Dans ce modèle, les absorptivités et émissivités utilisées pour la modélisation sont celles obtenues à partir des réflectances dynamiques. Dans ce cas les absorptivités et émissivités spectrales sont fonction de la température ($\alpha_{p,\lambda,T_{surf}}$, $\varepsilon_{p,\lambda,T_{surf}}$) et elles sont intégrées sur la totalité du spectre pour chaque température de cuisson de surface pour obtenir $\alpha_{p,T_{surf}}$ et $\varepsilon_{p,T_{surf}}$.

Dans le calcul du bilan thermique on prendra en compte le fait que les émissivités et absorptivités sont dorénavant des variables et leurs valeurs sont calculées en interpolant à partir des valeurs calculées sur le spectre de mesure.

3.3. Construction du Modèle C

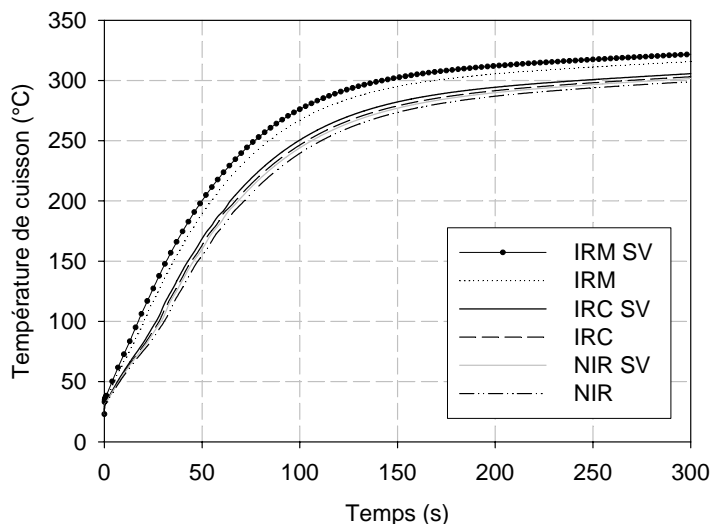
On abandonne l'hypothèse du corps noir pour les lampes et l'absorptivité intégrée sur le spectre $\alpha_{p,T_{surf}}$ est déduite des irradiances réelles des lampes infrarouges fournies par le constructeur. Son expression devient :

$$\alpha_{p,T_{surf}} = \left\{ \int_0^{\infty} ir(\lambda) \cdot \alpha_{p,\lambda,T_{surf}} d\lambda \right\} \cdot \frac{1}{\int_0^{\infty} ir(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

Le modèle D est celui utilisant les absorptivités statiques et l'irradiance réelle des lampes. Les modèles sont résolus par la méthode des volumes finis [4], on obtient une température de cuisson fonction du temps et de l'épaisseur z de la peinture ; dans la partie qui suit, nous ne parlerons que de la température de surface.

4. Résultats et discussion

4.1. Influence du spectre d'émission des sources infrarouges



Les Figures 1 et 2 illustrent, pour des cuissons réalisées avec différents émetteurs, les températures de cuisson simulées par les modèles B et C des peintures A et B blanches. Au bout de 300s, l'écart entre les températures de cuisson peut atteindre 20 (B) à 40°C (A).

Figure 1 : Modèle C - Cuisson de la peinture B blanche pour différents émetteurs

L'observation de ces figures montre que plus le pic d'émission de l'émetteur IR est déplacé vers les grandes longueurs d'onde, plus la vitesse de cuisson est rapide pour une température plus élevée. Ces simulations mettent en évidence qu'il existe un optimum pour l'absorption du rayonnement infrarouge, optimum centré à 2 μm environ pour les peintures blanches.

Une étude identique sur les poudres noires a conduit à des résultats sensiblement identiques, cependant les courbes sont nettement plus rapprochées (écart de 5°C max). Du point de vue du procédé, ces simulations de cuisson sous différents rayonnements infrarouges montrent combien le choix de l'émetteur approprié peut s'avérer judicieux pour optimiser le procédé de cuisson.

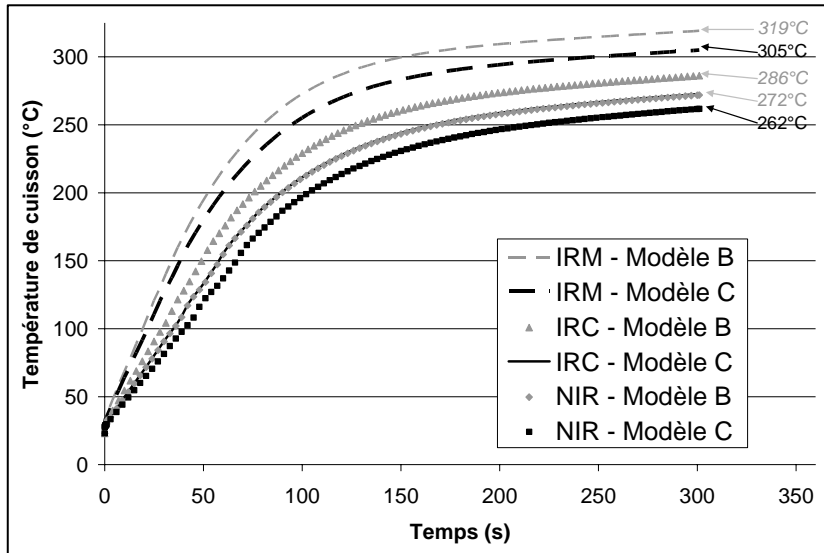


Figure 2 : Modèles B et C - Cuisson de la peinture A blanche pour 3 émetteurs

En termes de modélisation, cela signifie aussi qu'il faut décrire l'émittance précisément. Ainsi, comme le montre la Figure 2 en ce qui concerne les températures de cuisson simulées de la peinture A pour les émetteurs IRM, IRC et NIR, l'utilisation de l'hypothèse du corps noir pour modéliser l'émittance des sources infrarouges conduit à une surestimation de la température de cuisson de 10 à 15°C.

4.2. Influence des propriétés radiatives des peintures

La Figure 3 présente les courbes de cuisson de surface de la peinture A blanche simulées pour des cuissons sous IRM Nominal avec les modèles C et D (utilisation du spectre réel d'émission des lampes, absorptivité statique ou dynamique).

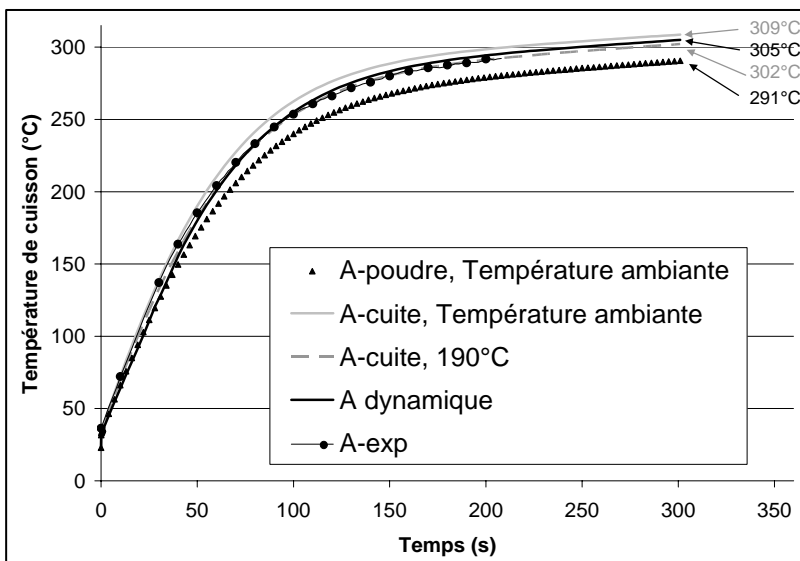


Figure 3 : Modèles C - Cuisson expérimentale et modélisée de la peinture A blanche

On observe que la température de cuisson obtenue avec l'absorptivité de la poudre est plus faible que celle obtenue avec celle de la peinture cuite. Ce résultat est dû au fait que les réflectances des poudres sont supérieures à celles des peintures cuites sur la plage de longueurs d'onde 1,4-3 μm et sont inférieures sur la plage 3-7 μm , comme on peut le voir Figure 4.

On peut d'autre part remarquer une différence de 7°C après 300 secondes de cuisson entre les températures de cuisson obtenues avec l'absorptivité de la peinture cuite à température ambiante et à 190°C, et ceci bien que les deux spectres de réflectance soient très proches (voir Figure 4).

Enfin, on peut noter que la courbe de cuisson 'dynamique' se situe entre celle issue de la

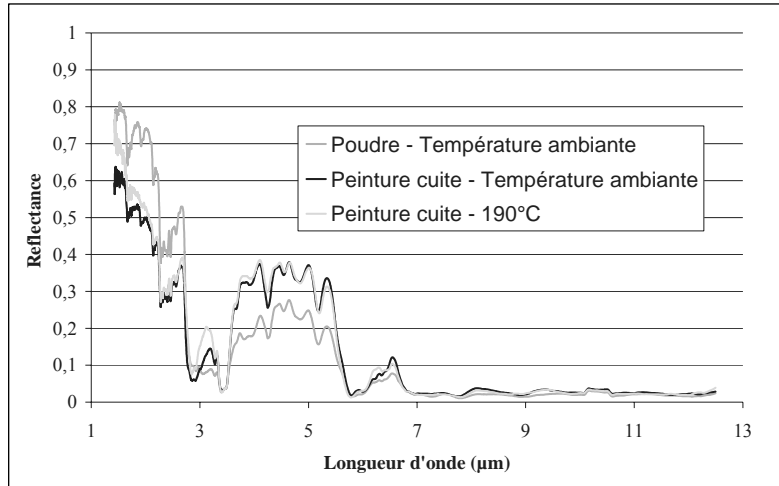


Figure 4 : *Réflectances expérimentales de la peinture A blanche poudre et cuite*

mesure de réflectance sur la poudre et celles issues des mesures sur la peinture cuite. Ce résultat est logique, car, pour la peinture A, les réflectances dynamiques évoluent entre les bornes constituées de la réflectance de la poudre et celle de la peinture cuite (non montré ici) ; ce ne sera pas forcément le cas pour les autres peintures. Ces résultats se retrouvent pour les simulations réalisées pour les autres émetteurs.

5. Conclusion

Cette étude des transferts radiatifs survenant au cours de la réticulation d'une peinture en poudre a montré que la connaissance des propriétés radiatives est un des paramètres importants pour déterminer l'émetteur IR le plus adapté pour la cuisson d'une poudre donnée. Pour les peintures A et B blanches, c'est l'émetteur IRM SV qui semble le plus adapté. La comparaison des modèles C et D a aussi mis en évidence que l'utilisation du corps noir pour représenter l'émittance des émetteurs IR conduit à surestimer de 10 à 15°C la température de cuisson des peintures.

Références

- [1] I. Bombard, L. Véchet, P. Laurent, J. Lieto, Optimisation de la cuisson sous infrarouge de deux types de peintures en poudre, *Congrès Français de Thermique*, SFT, Reims, 30 Mai – 2 Juin 2005.
- [2] I. Bombard, C. Cogné, P. Laurent, J. Lieto, Modélisation de la cuisson sous infrarouge de peintures en poudre par la méthode des éléments finis, *Congrès Français de Thermique*, SFT, Ile de Ré, 16-19 Mai 2006.
- [3] I. Bombard, P. Laurent, J. Lieto, A model for the cure of powder coatings based on surface absorptivities *in-situ* measurements, *FutureCoat*, ICE 2006, New Orleans, 1-3 November 2006.
- [4] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and heat flow, series in computational methods in mechanics and thermal science, Taylor & Francis Editors, 1980.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au support financier et technique de Philips Eclairage, EDF et de l'ADEME. La société Dupont Powder Coatings France SAS a gracieusement fourni les peintures utilisées durant l'étude. Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à ces sociétés ainsi qu'aux organisateurs du Congrès SFT 2007, pour leur aide et leurs conseils.