

Influence d'une résistance thermique dépendant de l'état de fusion sur le comportement thermique des poudres composites projetées par plasma

Mohamed BOUNEDER^{1,2}, Mohammed El GANAOU², Bernard PATEYRON², Pierre FAUCHAIS²

¹ Faculté des Sciences de l'ingénieur, Université Saad Dahleb de Blida, B.P 270 Blida 9000, Algérie.

² SPCTS, U.M.R. 6638 CNRS. Faculté des Sciences et Techniques de Limoges, France.

auteur correspondant : ganaoui@unilim.fr

Résumé - Le contact entre couches joue un rôle important dans le comportement des particules composites sous haute température (exemple bicouche métal/céramique en projection plasma). Le présent travail met en évidence l'intérêt de considérer un contact thermique dépendant de l'état de fusion des matériaux d'apport. Le modèle considère l'état transitoire de la particule le long de son parcours couplant transferts et changement de phase solide/liquide/vapeur.

Nomenclature

c_p	chaleur spécifique (J/kg.K)	Symboles grecs	
d	diamètre (m)	ε	émissivité
ρ	masse volumique (kg/m ³)	σ	constante de Stefan-Boltzman (=5.671 10 ⁻⁸ W/m ² .K ⁴)
k	conductivité thermique (W/m.K)	Δ	opérateur de différence
\bar{k}	conductivité thermique intégrée(W/m.K)	Σ	surface de contact solide-solide
h	coefficient d'échange plasma-particule (W/m ² .K)	Indices	
H	enthalpie spécifique (J/kg)	eb	ébullition
L	chaleur latente spécifique (J/kg)	c	centre
Nu	nombre de Nusselt	∞	gaz plasma
Pr	nombre de Prandtl	l	phase liquide
Re	nombre de Reynolds	s	surface ou phase solide
R	rayon de la particule (m)	p	particule
R_{th}	résistance thermique de contact (m ² K/W)	f	fusion
T	température (K)	0	état initial
t	temps (s)		

1. Introduction

Le comportement thermique de particules même de taille micrométrique dans un jet gazeux à haute température pose plusieurs défis sur le plan académique et industriel. La projection thermique en est un exemple directement issu de l'industrie de traitement de surface. Ainsi une particule (typiquement 50 μm de diamètre) qui traverse un jet de gaz (typiquement à 10000 K) échange de la chaleur par conduction mais subit aussi des transitions de phase fusion/solidification et évaporation. En terme d'optimisation du procédé (positionnement de la cible, quantité de matière déposée, reproductibilité des dépôts...etc) l'opérateur se trouve confronté à des choix pour lesquels il demande à être éclairé par la simulation numérique [1-6].

Celle-ci couplée à l'expérimentation a largement montré son efficacité pour aider à la compréhension des phénomènes et à l'optimisation de procédés. Les poudres mono matériau utilisées en projection thermique pour le revêtement de surface ont été ainsi très largement étudiées [1-3]. Celles constituées de particules bicouches présentent un intérêt particulier en

raison de la possibilité de produire des revêtements qui ont des propriétés mécaniques (résistance à la fatigue et à l'usure) intéressantes pour la fabrication de structures légères et renforcées [6]. L'étude de ces poudres s'est limitée à quelques travaux de faisabilité [3-4].

Généralement en présence de bicouches, les modélisations utilisent une résistance thermique de contact constante, en dépit du peu de sens physique attaché à cette hypothèse. Le travail présenté se propose de montrer l'apport d'un contact dépendant de l'état de fusion dans le cas d'une sphère bicouche soumise à des changements de phase par fusion et par évaporation. L'application est faite dans le cas de la projection thermique de poudres bicouches métal/céramique sous de faibles charges massiques de la flamme plasma (débit d'injection inférieur à 1kg/h, en projection par plasma d'arc soufflé Ar-H₂ 75-25% vol).

2. Modèles physique et mathématique

Le modèle traite le cas d'une sphère composite bicouche constituée de deux matériaux homogènes et isotropes, un cœur (*a*) et une enveloppe (*b*). La formulation enthalpique est adoptée pour l'équation de conservation de l'énergie avec changement de phase. La position du front est déterminée a posteriori [7]. En coordonnées sphériques axisymétriques (*r*, *g*, *z*), on peut écrire dans chacune des deux couches :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[k_p(T) r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \sin g} \frac{\partial}{\partial g} \left[k_p(T) \sin(g) \frac{\partial T}{\partial g} \right] + S(r, g, t, T) \quad (1)$$

Les conditions initiales et aux limites associées au problème sont :

$$T(r, g, 0) = T_0$$

$$\left[\frac{\partial T(r, g)}{\partial r} \right]_{r=0} = 0 \quad \text{et} \quad \left[\frac{\partial T(r, g)}{\partial g} \right]_{g=0, \pi} = 0 \quad (2)$$

$$\left[k_p(T) \frac{\partial T(r, g)}{\partial r} \right]_{r=R} = h_\infty (T_s - T_\infty) - \varepsilon \sigma T_s^4 - \dot{m}_v L_v$$

L'évaporation de la particule est prise en compte. Le coefficient de transfert de chaleur est relié au nombre de Nusselt par la corrélation de Ranz & Marshall modifiée pour tenir compte des conditions propres du milieu plasma [2]:

$$h_\infty = \frac{\bar{k}_\infty}{d_p} \left[2 + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33} \right] \cdot \left((\rho\mu) / (\rho\mu)_{sp} \right)^{0,6} \left(C_p / C_{p,sp} \right)^{0,38} \quad (3)$$

La condition à l'interface de deux matériaux superposés *a* et *b* en contact imparfait est :

$$\left[k \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{\Sigma} = \frac{T_{\Sigma}^+ - T_{\Sigma}^-}{R_{th}} = \frac{\Delta T_{\Sigma}}{R_{th}} \quad (4)$$

Pour pallier à l'insuffisance d'un modèle avec une *R_{th}* constante, un modèle à résistance variable a été élaboré en fonction de la cinétique du changement de phase solide/liquide des deux constituants (cœur et enveloppe).

Soient *f_{sa}* et *f_{sb}* les fractions solides dans la couche *a* et dans la couche *b* et *f_{sm}* = (*f_{sa}* + *f_{sb}*) / 2 leur moyenne arithmétique. On considère une variation linéaire allant de *R_{thl}* quand tout est

solide ($f_{sa}=f_{sb}=f_{sm}=1$) à un contact quasi-parfait ($10^{-8} m^2 K/W$) quand tout est liquide ($f_{sa}=f_{sb}=f_{sm}=0$).

$$R_{th}(f_{sm}) = f_{sm} R_{th1} + (1 - f_{sm}) R_{th2} \quad (5)$$

Ce modèle s'inspire de la physique, dans la mesure où les liquides mouillent et favorisent le contact en remplissant les vides interstitiels. On parlera dans les applications de résistance variable de R_{th1} à R_{th2} pour désigner une variation selon l'expression (5).

La solution numérique est basée sur une approximation de type volumes finis de second ordre dans le temps et l'espace. En raison de l'étendue de la gamme de températures (de 300 à 3000 K), les propriétés thermo physiques des matériaux sont fonctions de la température.

3. Résultats et discussions

Les comportements de la particule et leur dépendance vis-à-vis de la cinétique de changement de phase solide/liquide/vapeur sont examinés. Le modèle est testé sur deux intervalles de R_{th} (de 10^{-5} à $10^{-8} m^2 K/W$ et de 10^{-6} à $10^{-8} m^2 K/W$). Les résultats montrent que la particule bicouche subit un traitement thermique avec des cinétiques de transition de phase différentes de celles rencontrées pour une résistance thermique de contact R_{th} constante.

Pour une résistance thermique de contact R_{th} variant linéairement de 10^{-5} à $10^{-8} m^2 K/W$, la figure 1 montre le traitement thermique de la particule Fe/Al₂O₃. A sa sortie du dard plasma, la particule ayant perdu par évaporation plus de 75% de son enveloppe, la capacité thermique étant devenue faible, la chute de la température du plasma couplée à l'amorce de la fusion du cœur Fe (absorption de la chaleur latente) fait chuter brutalement sa température. Ce comportement n'a pas été observé précédemment car l'épaisseur de la couche d'alumine n'avait pas encore été entamée. L'évaporation stabilise l'échauffement de la couche par une perte de masse. La couche enveloppe ne s'évapore pas complètement ; une fraction volumique de celle-ci se re-solidifie avant d'atteindre le substrat. Le cœur de la particule arrive complètement fondu. Bien que le saut initial de température soit élevé, il se réduit au fur et à mesure que les fractions liquides (de l'alumine et du fer) augmentent en améliorant l'échange thermique.

Ce modèle montre par ailleurs qu'il est possible de projeter efficacement des particules dont la résistance thermique de contact R_{th} est de $10^{-5} m^2 K/W$ (mauvais contact pouvant être rencontré pour les poudres élaborées par mécanofusion [8]) pour peu que la couche enveloppe soit un peu plus épaisse et permette l'obtention d'un rendement convenable.

La figure 2 présente les résultats de la deuxième gamme (R_{th} variable de 10^{-6} à $10^{-8} m^2 K/W$). On observe cette fois-ci une disparition remarquable du saut de température lorsque toute la particule est liquide. Aucune chute de température n'apparaît dans la couche enveloppe, car la fusion du cœur de la particule n'est pas suffisante pour la provoquer. En ce qui concerne la transition de phase solide/liquide, les prévisions numériques montrent que l'enveloppe Al₂O₃ fond totalement avant le cœur de Fe. L'évaporation est retardée à 0.42 ms (contre 0.35 ms dans le cas de la résistance thermique de contact constante $R_{th} = 10^{-6} m^2 K/W$).

Ces deux exemples illustrent l'impact du contact sur la cinétique globale des changements de phase et les transferts transitoires. Les figures 3 et 4, présentent les évolutions des sauts de température prédits par simulations pour différentes valeurs de la R_{th} . Les résultats dévoilent que les sauts enregistrés dans le cas de résistance thermique de contact constante sont toujours plus élevés (d'environ 200 K) et persistent dans toute la durée du transitoire. Ceux obtenus avec résistance thermique de contact R_{th} variable évoluent et

s'annihilent au fur et à mesure que la R_{th} décroît réduisant le temps du transitoire. D'un point de vue thermomécanique, un saut de température qui se maintient longtemps nuit dangereusement à l'intégrité de la particule (risque de rupture de l'enveloppe sous l'effet de l'expansion du cœur).

L'influence de la résistance thermique de contact R_{th} sur le changement de phase des deux couches en présence est aussi illustrée dans le tableau 1. On reporte quelques ordres de grandeurs (saut maximum et temps de début de fusion) enregistrés avec les deux modèles pour une particule Fe/Al₂O₃ de 60 μm de diamètre avec 2 μm d'Al₂O₃ dans un plasma Ar-H₂ 75-25 % vol.

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques de transition de phase solide-liquide

R_{th1} ($\text{m}^2\text{K/W}$)		10^{-5}	5.10^{-6}	2.510^{-6}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Cas variable de R_{th1} à 10^{-8}	ΔT_{max} (K)	2085 <u>2272</u>	1621 <u>1943</u>	1257 <u>1454</u>	660 <u>728</u>	86 <u>97</u>	15 <u>15</u>
	<u>Cas constant</u> <u>souligné</u> <u>($R_{th}=R_{th1}$)</u>	- -	0.343 <u>0.436</u>	0.311 <u>0.339</u>	0.304 <u>0.302</u>	0.288 <u>0.310</u>	0.288 <u>0.288</u>
	τ_{Al2O3} (ms)	0.200 <u>0.200</u>	0.204 <u>0.204</u>	0.220 <u>0.220</u>	0.255 <u>0.256</u>	0.324 <u>0.288</u>	0.328 <u>0.328</u>

De manière générale le saut à l'interface diminue avec la résistance. Les sauts enregistrés avec une R_{th} variable sont plus faibles que dans le cas constant (le contact s'améliore avec l'augmentation de la fraction liquide). Pour les temps caractéristiques, jusqu'à une valeur de la R_{th} égale à $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K.W}$, les deux modèles influencent peu les temps de début de fusion de Al₂O₃ (τ_{Al2O3} (ms)) qui augmente avec R_{th} . C'est la couche interne de Fe qui fond en premier pour une R_{th} plus faible ($<10^{-6}$), et la tendance est inversée ensuite.

En revanche, l'influence des modèles se fait sentir sur les temps de début de fusion du Fe et en général le modèle avec résistance variable prévoit des temps plus courts (τ_{Fe} (ms)). Ces résultats semblent plus cohérents d'un point de vue physique car le temps de début de fusion de Al₂O₃ intéresse la surface de la particule en contact avec le milieu plasma. Par contre le flux de chaleur absorbé par le fer est lié directement au gradient thermique à l'interface : plus faible est ce gradient, plus élevé est le flux de chaleur absorbé.

Un autre phénomène important est celui de la re-solidification de l'enveloppe Al₂O₃ qui est obtenu lorsqu'une résistance thermique de contact est considérée entre 10^{-6} et $5.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ et qui n'est pas observé pour R_{th} constante (Figs. 5 & 6). Alors que le modèle avec une résistance thermique de contact variable prévoit une fraction volumique solide faible et qui prend naissance à l'intérieur, le modèle constant prédit une valeur plus importante et la fusion débute depuis l'extérieur.

En ce qui concerne la deuxième transition de phase liquide/vapeur de l'enveloppe Al₂O₃, le modèle constant prévoit un taux d'évaporation supérieur à celui du modèle variable.

Ces résultats prouvent clairement que les deux modèles induisent des différences notables dans la durée et l'intensité du saut de température à l'interface. Le présent travail continue pour qualifier les cinétiques de transition de phase à travers la quantification du comportement instationnaire du saut à l'interface. En particulier la compréhension de la

cinétique de l'évaporation à travers l'histoire thermique de la particule est importante pour le rendement du procédé visant à projeter des poudres composites.

4. Conclusions

Un modèle de contact variable avec l'état de fusion de deux couches en contact lors du traitement thermique par projection en jet plasma de poudres composites en plasma thermique est présenté. Le travail apporte une quantification basée sur une résolution complète des modèles de transferts couplés aux changements de phase. La sensibilité de l'état final (à l'impact sur la cible) à l'histoire thermique des particules montre l'importance de la résistance thermique de contact dans ce procédé.

Remerciements : Les auteurs remercient le programme FAD Franco-Algérien et l'Agence Universitaire de la Francophonie pour leurs supports financiers.

Références

- [1] M.Vardelle, A.Vardelle, P.Fauchais and M.I.Boulos, Plasma-Particle Momentum and Heat Transfer: Modeling and Measurements, AIChE, (1983), 236-243.
- [2] Y.C.Lee and E.Pfender, Particle Dynamics and Particle Heat and Mass transfer in Thermal Plasma.3.Thermal Plasma-Jet Reactor and Multiparticle Injection, Plasma Chem. Plasma Process, Vol.7 (1987) pp1-27.
- [3] Y. P. Wan, V.Prasad, G.X.Wang, S.Sampath, J.R.Fincke ,Model and Powder particle Heating, Melting, Resolidification, and Evaporation in Plasma Spraying Processes. J.Heat Transfer ASME, Vol.121 (1999), 691-699.
- [4] M.D.Ghoniem, A.S. Lavine, N.M. Lavine, Feasibility of plasma spraying in developing MMC coatings: Modeling the heating of powder particles, J. of Manu. Sci. Eng. Vol.124 (2002), 58-64.
- [5] M.Boueder, M.El Ganaoui, B.Pateyron, P.Fauchais, Coupled heat transfer and phase change modeling in composite(iron/ceramic) particle immersed in plasma pool,TTP8 E-MRS, Spring Meeting Symp.Strasbourg (France), 2004.
- [6] S.P. Rawal , Metal Matrix composite for space applications, JOM 53, (2001), 14-17.
- [7] El Ganaoui M., Lamazoude A. Bontoux P. And Morvan D. Computers & Fluids, 31, Issue (4-7), PP. 539-556, 2002.
- [8] H. Ageorges, P. Fauchais, Oxydation of stainless steel with and without an alumina shell during their flight in plasma. High temperature Material Process. , Vol.4 (2000), Begell House.
- [9] C.R. Swaminathan, V.R. Voller, On the enthalpy method, Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, Vol.3 (1999), 233-244.
- [10] J.M.Khodadadi, Y.Zhang, Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers, Int. J. of Heat and Mass Transfer 44 (2001), 1605-1618.
- [11] Jets & Poudres, Téléchargeable à partir de : [http:// jets & poudres.free.fr](http://jets & poudres.free.fr)

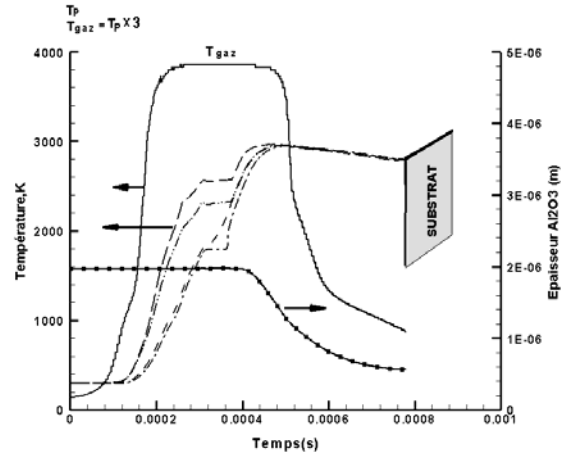
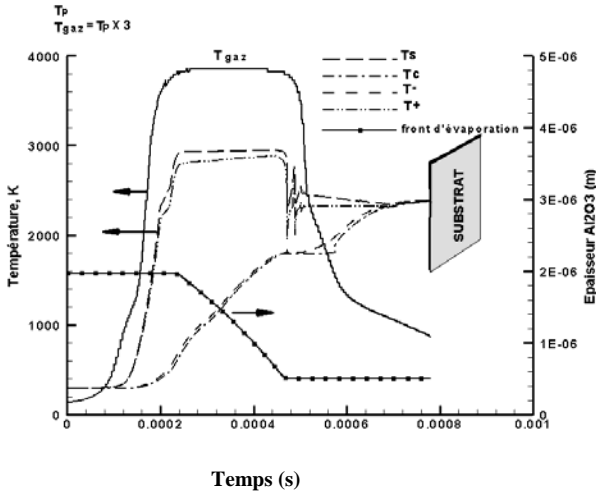


Figure 1 : Histoire thermique d'une particule Fe/Al₂O₃ ($d_p=60 \mu\text{m}$, $R_a/R_b=0.93$, R_{th} variable de 10^{-5} à $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/W}$).

Figure 2 : Histoire thermique d'une particule Fe/Al₂O₃ ($d_p=60 \mu\text{m}$, $R_a/R_b=0.93$, R_{th} variable de 10^{-6} à $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/W}$).

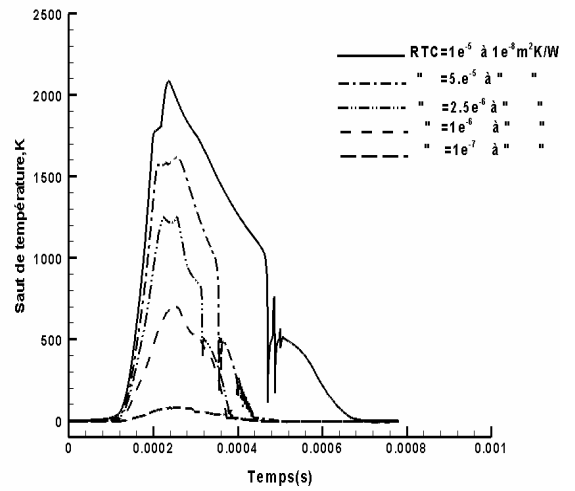
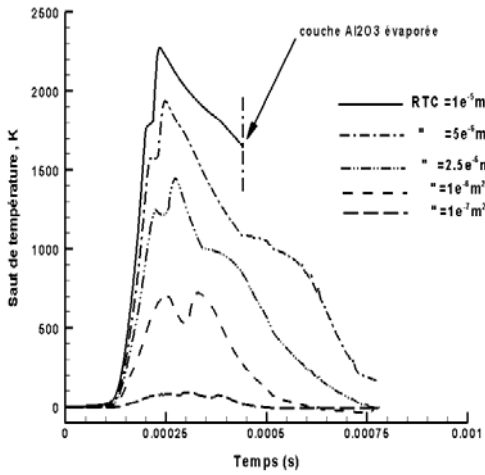


Figure 3 : Évolution du saut à l'interface (cas d'une R_{th} constante).

Figure 4 : Évolution du saut à l'interface (cas d'une R_{th} variable).

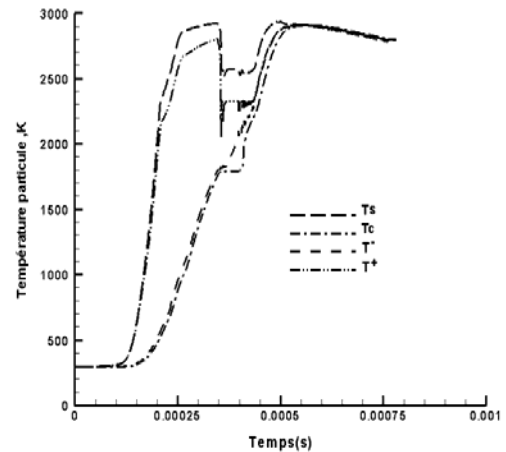
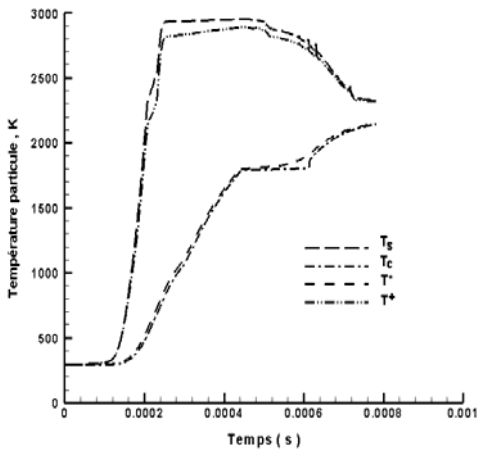


Figure 5 : Histoire thermique dans une particule Fe/Al₂O₃ avec R_{th} constante de $5.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$.

Figure 6 : Histoire thermique avec R_{th} variable de $5.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ à $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/W}$.

