

Simulation numérique d'une particule d'alumine fondue s'écrasant sur un substrat froid

Soufiane OUKACH^{1,2}, Bernard PATEYRON², Mohammed ELGANAOUT³ et Hassan HAMDI¹

¹Laboratoire LMFE (URAC27), Dpt de Physique, FSSM, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

²Laboratoire SPCTS (UMR 6638 CNRS), Université de Limoges, FST-Limoges France.

³Laboratoire LERMAB, Institut Carnot, Université Henri Poincaré, Nancy, France.

Résumé

On se propose de simuler par la méthode des éléments finis l'écrasement d'une particule d'alumine sur un substrat d'acier inoxydable dans les conditions de la projection plasma. L'effet de la vitesse d'impact sur le comportement dynamique de la lamelle obtenue est étudié ainsi que la prédiction de l'histoire thermique de la particule et du substrat au cours de l'étalement. La mouillabilité et la surfusion sont prises en considération. La méthode « Level Set » est utilisée pour suivre l'interface entre la particule et l'atmosphère qui l'entoure.

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, J/(kg.K)	T_s	température en haut du substrat, K
D	diamètre de la lamelle, m	u	vitesse, m/s
D_i	diamètre initial de la goutte, m	V_i	vitesse d'impact, m/s
F_{TS}	résultante des forces de surface, N	<i>Symboles grecs</i>	
g	accélération de la pesanteur, m/s ²	θ	angle de contact,
k	courbure moyenne, m	λ	conductivité thermique, W/(m ² K)
n	normale à l'interface	ξ	coefficient d'étalement
p	pression, Pa	ε	épaisseur de l'interface, m
q	flux de chaleur, W/m ²	Φ	fonction «Level Set »
R_{th}	résistance thermique de contact, (m ² K)/W	δ	fonction de Dirac
t	temps, s	ρ	masse volumique, kg/m ³
T	température, K	γ	paramètre de stabilisation de Φ , m
T_g	température en bas de la goutte, K	σ	tension superficielle, N/m
T_m	température de fusion, K	μ	viscosité dynamique, Pa.s

1. Introduction

La projection plasma est une des techniques de traitement de surface qui consiste à injecter des particules métalliques ou céramiques (diamètre de 10 à 100 μm) dans un jet plasma où elles reçoivent une quantité de mouvement et de chaleur, elles arrivent au substrat en état fondu ou semi fondu avec des vitesses qui peuvent être supersoniques [1]. Elles s'étalent et se solidifient rapidement en lamelles orientées parallèlement au substrat dont l'empilement forme un dépôt qui se caractérise par une structure lamellaire hétérogène [2]. Ce dépôt a pour fonction la protection de la surface des matériaux sensibles d'un voisinage mécanique ou thermique éprouvant. Les propriétés du dépôt obtenu sont fortement liées au contact lamelle-substrat ou lamelle-lamelle [3,4]. L'étude de l'écrasement d'une particule fondue sur un substrat est une étape nécessaire pour une meilleure compréhension des dépôts obtenus par projection plasma afin d'optimiser leur qualité et leur performance

Ici, on s'intéresse à l'étude de l'effet de la vitesse d'impact sur le processus de l'écrasement d'une particule sur un substrat solide en tenant compte des phénomènes de la mouillabilité et de la surfusion. Ces deux phénomènes sont négligés dans plusieurs études alors qu'ils ont un rôle primordial dans le processus de la solidification de la lamelle ainsi que dans sa morphologie finale.

2. Modélisation et mise en équation

Dans cette étude, une simulation 2D axisymétrique du processus de l'écrasement d'une particule d'alumine sur un substrat en acier inoxydable est effectuée en se fondant sur les équations du Navier Stokes (Eq. 1 et Eq. 2) pour décrire l'écoulement et sur l'équation de chaleur (Eq. 3) pour calculer le champ de température dans la particule et dans le substrat ainsi que le transfert de chaleur de la particule vers le substrat en tenant compte du transfert de chaleur par convection. La configuration initiale de ce modèle est représentée sur la figure 1. L'équation 4 tient compte de l'effet des forces de tension de surface.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla)u = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho g + F_{TS} \quad (Eq. 1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (Eq. 2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = -\rho C_p u \nabla T \quad (Eq. 3)$$

$$F_{TS} = \sigma k \delta n \quad (Eq. 4)$$

Les conditions aux limites, pour l'écoulement du fluide, sont de type axi symétrie sur l'axe de la goutte, paroi mouillée sur l'interface entre la goutte et le substrat et non glissement sur les autres parois. Pour le transfert de chaleur, sur l'axe de la goutte une condition de type axi symétrie est utilisée et d'isolation thermique sur les autres parois. La condition paroi mouillée permet de considérer le phénomène de la mouillabilité par l'introduction de l'angle de contact à l'équilibre θ . Dans cette étude $\theta=70^\circ$ [5].

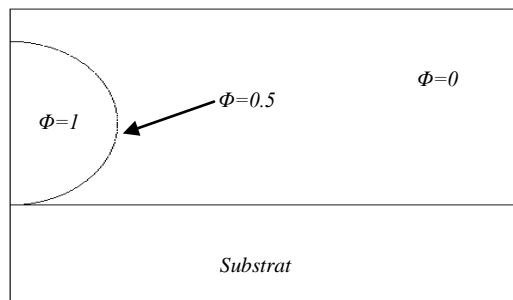


Figure 1. Géométrie et configuration initiale du problème

Pour le suivi de l'interface entre les deux fluides (liquide et gaz) et le changement de topologie au cours du temps la méthode « level set » est utilisée sur un maillage fixe [6]. L'interface entre le liquide et le gaz qui l'entoure est représentée comme une ligne de niveau d'une fonction ϕ en fonction du temps et de l'espace. Cette fonction vaut 0 dans un domaine et 1 dans l'autre. À l'interface, il y a une transition régularisée entre 0 et 1, l'interface est alors représentée implicitement par l'iso contour adimensionnel de valeur 0.5 (Figure 1). La fonction « Level Set » ϕ est liée à l'écoulement du fluide à la vitesse u , ceci est décrit par l'équation :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}) \quad (Eq. 5)$$

Les termes à gauche de cette équation décrivent le mouvement de l'interface, tandis que ceux de droite sont nécessaires à la stabilité numérique. Le paramètre ϵ , détermine l'épaisseur de la région de régularisation de la fonction ϕ alors que le paramètre γ détermine la stabilisation de la fonction « Level Set » [7]. En général ϵ prend la valeur $h/2$, avec h le pas de maillage caractéristique de la région de l'interface et γ la valeur de la vitesse maximale dans le modèle.

Dans les conditions de projection thermique les degrés de surfusion atteints sont de l'ordre de 0,1 à 0,2Tm [7]. Dans ce modèle un degré de surfusion de 0.2Tm est pris, soit 465 K sachant que la température de fusion de l'alumine est Tm= 2327 K.

La résistance thermique de contact est considérée constante dans différentes études [8,9,10], mais en principe elle devrait varier (en fonction du temps et la position). L'évolution de cette résistance en fonction du temps est estimée en utilisant la relation ci-dessous (Eq 6) [11] et c'est cette équation qui est utilisée dans pour évaluer la résistance de contact au cours de l'étalement de la particule.

$$R_{th} = \frac{Tg - Ts}{q} \quad (Eq.6)$$

Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes: l'écoulement du fluide est newtonien et celui de la goutte est incompressible, l'air n'a aucun effet sur l'étalement de la particule, le transfert de chaleur par rayonnement est négligé et la solidification de la lamelle commence après l'achèvement de son étalement. La fusion partielle qui peut avoir lieu dans le substrat est négligée. Ce modèle a été implanté dans le code de calcul « Comsol multiphysics 3.5a » [12] et sa validation a été l'objectif de quelques travaux précédents [13,14]

3. Résultats et discussion

L'étalement d'une particule d'alumine sur un substrat froid en acier inoxydable est représenté sur la figure 2 pour deux valeurs de la vitesse d'impact $V_i=50$ m/s et $V_i=150$ m/s. Les propriétés thermo physiques utilisées dans cette simulation sont représentées dans le tableau ci dessous.

	ρ	μ	T_i	λ	Cp	σ	dimension
	$kg.m^{-3}$	$Pa.s$	K	$W/(m^2.K)$	$J/(kg.K)$	N/m	μm
Alumine	2755	12.10^{-3}	2800	5	1504	0.6	diamètre : 25
Air	1.3	$1.7 \cdot 10^{-5}$	300	0.0262	1004		-
Acier inoxydable	7850	-	300	44.5	475	-	épaisseur : 10

Tableau 1: Propriétés thermo physiques utilisées dans cette simulation

Pour $V_i=50$ m/s, la particule s'étale sous forme d'une lamelle avec un bourrelet à la périphérie lié à l'accumulation de masse sous l'effet des forces de tension de surface. A la fin de l'étalement la zone centrale de la lamelle est la plus fine que le reste de la lamelle et la défragmentation commence juste avant la fin de l'étalement. La zone où la défragmentation est observée correspond à la zone où s'effectue la collision. Des pores peuvent être alors observés sur la partie centrale des lamelles. Pour une vitesse très élevée, $V_i=150$ m/s, la particule subit une forte déformation, elle se défragmente sous forme de doigts (digitations) qui se rompent pour former des petites gouttelettes. Ceci est dû à l'importante énergie cinétique qui vainc l'énergie des forces de tension de surface de la goutte. À la fin de l'étalement la lamelle se présente sous forme d'une lamelle déchiquetée avec une zone d'éclaboussures sur sa périphérie. En augmentant la vitesse d'impact, la particule s'étale plus vite (Fig.2); par exemple pour $V_i=50$ m/s le temps d'étalement est de l'ordre de 1.6 μs alors que pour $V_i=150$ m/s il est de l'ordre de 0.58 μs , soit presque 2.8 fois plus faible. Le coefficient d'étalement $\xi = D / Di$, est un paramètre qui a une grande importance dans l'étude de l'impact des particules sur des surfaces rigides, son évolution avec le temps permet d'avoir une idée sur l'impact et l'étalement de la particule. L'effet de la vitesse d'impact sur ce coefficient est montré sur la figure 3. Ce coefficient atteint une valeur maximale $\xi=3.4$ à l'instant $t=0.6 \mu s$ pour $V_i=150$ m/s alors que pour $V_i=50$ m/s il atteint presque la même valeur au bout de 1.5 μs .

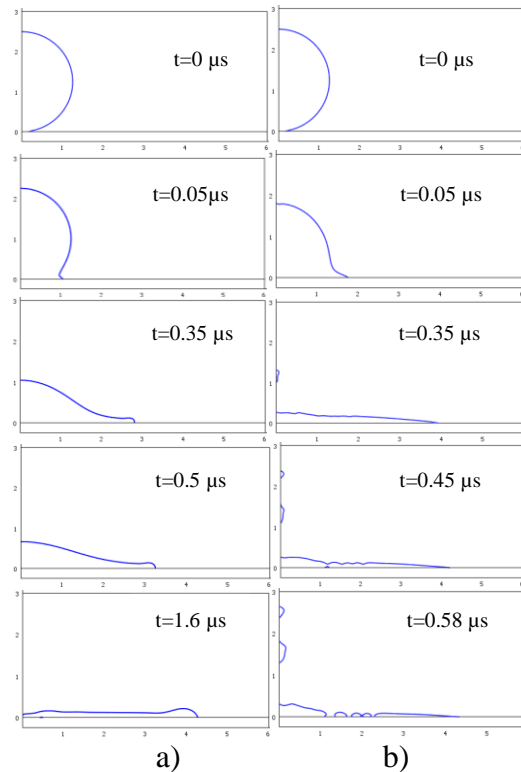


Figure 2. Différents temps d'étalement d'une particule d'alumine sur un substrat en acier inoxydable: a) $V_i=50$ m/s, b) $V_i=150$ m/s

Au moment de l'impact, la partie du liquide près de la surface solide du substrat est soumise à une forte compression ce qui force le liquide à s'étaler avec une vitesse radiale très grande comme il est montré sur la figure 3. Aux premiers instants, ce coefficient augmente rapidement ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande. La compression que subit la goutte au moment de l'impact augmente avec la vitesse d'impact, ce qui est montré sur la figure 4 (représentant la pression au niveau du point de contact aux premiers instants après la collision). Pour une vitesse $V_i=50$ m/s la pression atteint une valeur de l'ordre de 75 MPa et pour une vitesse $V_i=150$ m/s elle atteint une valeur de l'ordre de 200 MPa. Cette forte compression au moment de l'impact est responsable de l'éjection de matière sur l'axe de la goutte dans le sens inverse de l'impact comme il est observé sur la figure 2. D'autres petites gouttelettes qui n'ont pas été simulées, en raison de la limite de la géométrie, viennent s'ajouter aux résidus de l'alumine sur l'axe de la particule d'où l'augmentation en volume de ces résidus comme il est montré sur la figure 2.b aux instants $t=0.45 \mu\text{s}$ et $t=0.58 \mu\text{s}$.

La figure 5 montre l'évolution de la température au centre de la goutte ainsi que celle sur différents points de l'axe du substrat pour deux valeurs de la vitesse d'impact: $V_i=50$ m/s et $V_i=150$ m/s. Selon cette figure, le centre de la goutte se refroidit avec l'étalement, et le gradient de refroidissement augmente avec la vitesse d'impact (à l'instant $t=0.5 \mu\text{s}$, le centre de la goutte atteint une température de 2400 K pour $V_i=50$ m/s et une valeur de 1750 K pour $V_i=150$ m/s). D'après la figure 5, la température atteinte par la lamelle à la fin de l'étalement est très proche de celle de la solidification, en tenant compte du phénomène de la surfusion, ce qui fait que le temps d'étalement d'une lamelle peut être négligé devant celui de la solidification ce qui justifie l'hypothèse de considérer que la solidification commence après que l'étalement soit achevé. Pour le substrat et pour les deux valeurs de la vitesse d'impact, la température sur l'axe augmente jusqu'à une valeur maximale puis diminue au fur et à mesure que la particule s'étale. Le point qui s'échauffe le plus vite et aussi celui qui s'échauffe le plus.

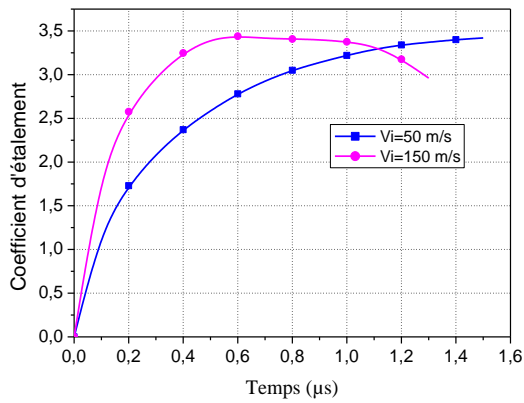


Figure 3: Evolution du coefficient d'étalement pour $V_i=50$ m/s et $V_i=150$ m/s

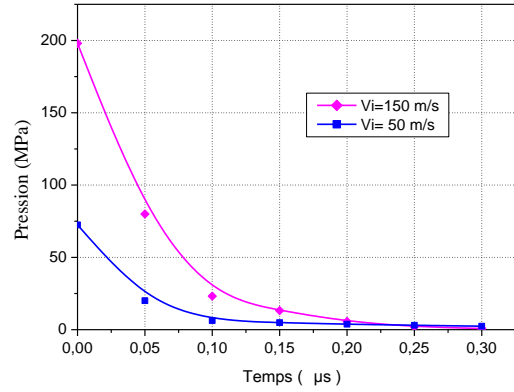


Figure 4: Pression au point de contact aux premiers instants de l'impact pour $V_i=50$ m/s et $V_i=150$ m/s

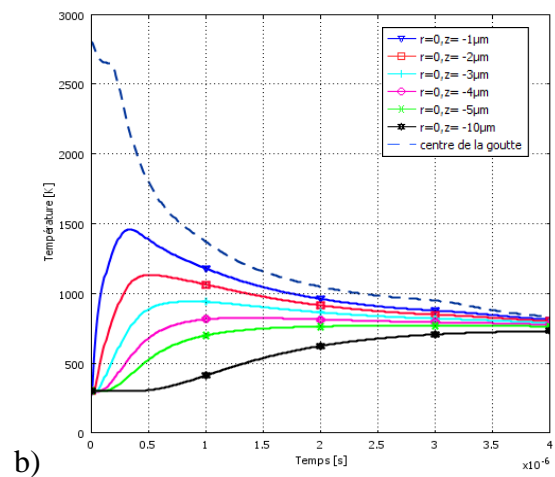
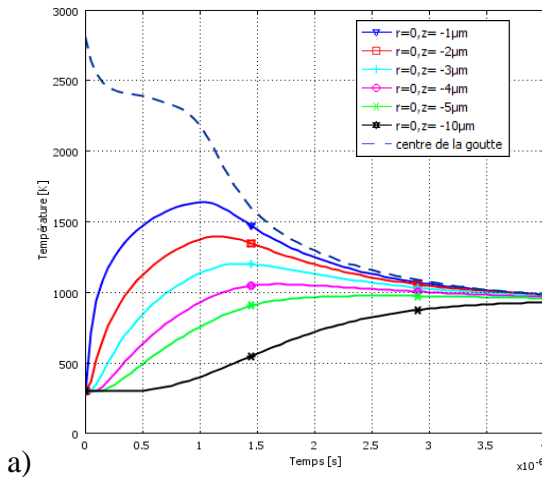


Figure 5: Evolution de la température au centre de la goutte et aux différents points sur l'axe du substrat: a) $V_i=50$ m/s et b) $V_i=150$ m/s

La température sur l'axe du substrat augmente et atteint une valeur maximale et elle diminue lorsque la vitesse d'impact augmente, par exemple au point ($r = 0, z = -1\mu\text{m}$) la température atteint une valeur de l'ordre de 1600 K pour $V_i = 50$ m/s et seulement 1450 K pour $V_i=150$ m/s, ceci peut être dû au temps d'étalement de la particule qui se réduit avec la vitesse d'impact. L'évolution de la résistance de contact à différents instants de l'étalement de la particule est représentée sur la figure 6. Elle varie avec le temps et la position radiale de l'interface. Aux premiers instants de l'étalement, la résistance de contact diminue et passe par un minimum. En effet aux premiers instants juste après l'impact de la goutte, la pression au sein du liquide est très forte ce qui se traduit par un bon contact lamelle-substrat, d'où la diminution de la résistance thermique de contact au cours de ces premiers instants, le transfert de chaleur de la lamelle vers le substrat est favorisé ainsi que la solidification de la lamelle.

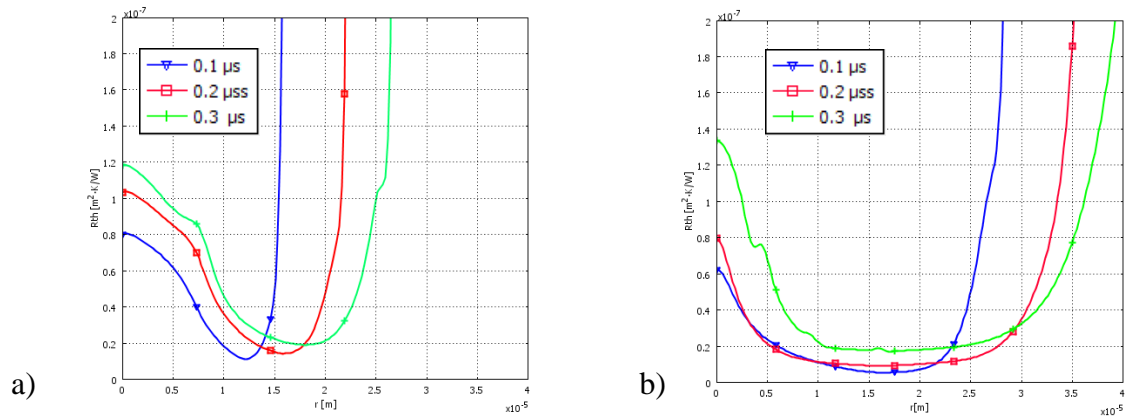


Figure 6: Evolution de la résistance thermique de contact à l'interface lamelle- substrat à différents instants de l'étalement: a) $V_i=50$ m/s et b) $V_i=150$ m/s

4. Conclusion

Dans cette étude, la simulation numérique de l'écrasement d'une particule fondue d'alumine de taille micrométrique (25 μ m) sur un substrat en acier inoxydable est représentée par un modèle numérique par éléments finis. L'effet de la vitesse d'impact sur la cinétique de la particule ainsi que sur l'histoire thermique du système dépôt/substrat a été étudié.

Références

- [1] B. Pateyron, M-F. Elchinger, G. Delluc and P. Fauchais, "Sound velocity in different reacting thermal plasma systems", Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1996, 16 (1), pp. 39-57
- [2] P. Fauchais, Understanding plasma spraying, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, pp. R86-R108.2004
- [3] V.V. Sobolev and J.M. Guilemany, "Flattening of Droplets and Formation of Splats in Thermal Spraying: A Review of Recent Work.Part 1", J.of Thermal Spray Tehnology, (8)1, 87-101, 1999
- [4] V.V. Sobolev and J.M. Guilemany, "Flattening of Droplets and Formation of Splats in Thermal Spraying:A Review of Recent Work.Part 2", J. of Thermal Spray Technology, 8(2), 301-314,1999
- [5] Y. Mebdoua, "Etude numérique des phénomènes contrôlant la solidification d'une lamelle en projection thermique application à la formation du dépôt », thèse de l'université de Limoges, 2008
- [6] J. Sethian, "Level Set Methods: Evolving Interfaces in Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision and Material Sciences, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [7] R. Mcpherson "On the formation of thermally sprayed alumina coatings", J.of Mat. Sci., Vol. 25, pp. 3677-3682.1980
- [8] M. Pasandideh-Fard, R. Bohla, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Deposition of tin droplets on a steel plate: simulation and experiments". Int. J. Heat Mass Trans., vol. 41, 2929-2945, 1998
- [9] M.Pasandideh-Fard and J Mostaghimi, " On the spreading and solidification of molten particles in a plasma spray process effect of thermal contact resistance". Plasma Chemistry and Plasma Processing 16, 83-98,1996
- [10] B. Xiong, C. M. Megaridis D. Poulikakoand H Hoang, "An investigation of key factors affecting solder micro droplet deposition" Journal of heat transfer, 120(1), pp 259-270, 1998
- [11] K. Fataoui, "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique. Modèle mécano thermique de l'étalement de la gouttelette", thèse de l'université de Limoges, 2007
- [12] [http:// www.comsol.com](http://www.comsol.com)
- [13]S.Oukach, H. Hamdi, M. El Ganaoui, and B. PATEYRON, "Effect of impact velocity and wettability on the dynamics of liquid droplet impact", The 3rd International Conference on Recent Advances in Composite Materials, December 13-15, 2010, Limoges, France
- [14] S. Oukach, B. Pateyron, M. El Ganaoui et H. Hamdi, "Simulation numérique de l'étalement d'une goutte sur une paroi", 1er Congrès de l'Association Marocaine de Thermique (AMT 2010), 6 et 7 mai 2010 Settât, Maroc.