

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE BLIDA 1
INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALE**



THESE

**Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTEUR EN
AERONAUTIQUE**

Spécialité : Aéronautique

Présentée et soutenue par :

DRIOUCHE Mouloud

Sujet :

**Etude de dépôt de poudre céramique sur un substrat métallique
sous l'effet d'un jet de haute température**

Soutenue publiquement, le **13 Juillet 2021**, devant le jury composé de :

BOUKRAA Salah	Professeur, USD Blida1	Président
REZOUG Tahar	Professeur, USD Blida1	Directeur de thèse
EL GANAOUI Mohamed	Professeur, Université de Lorraine - France	Co- Directeur de thèse
MATAOUI Amina	Professeur, USTHB	Examineur
AZZAZ Mohamed	Professeur, USTHB	Examineur
BENKHEDDA Amina	Professeur, USD Blida1	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu, ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force, la foi, le courage et la volonté afin de réaliser cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur T. REZOUG, Professeur à l'institut d'Aéronautique et les Etudes Spatiales (Université blida1), qui a accepté d'être mon directeur de thèse et qui m'a aidé beaucoup pour la réalisation de mon travail, aussi pour son grand et total soutien, son suivi et ses conseils précieuses durant mon projet de recherche

J'exprime mes vifs remerciements, à Monsieur M. EL GANAOUI, Professeur, Université de Lorraine - France , pour ses conseils éclairés et sa large expérience scientifique qui ont permis l'aboutissement de ce travail, ainsi que sa disponibilité totale pour m'avoir aidé à la réalisation de cette thèse.

Mes grands remerciements vont aussi pour les membres de jury qui m'ont honoré d'avoir accepté et consacré de leur temps pour examiner mon travail, et la rédaction des rapports de cette thèse : Monsieur SALAH BOUKRAA, Professeur à l'institut d'Aéronautique et les Etudes Spatiales (Université blida1) et Madame A. BENKHEDDA, Professeur à U. de Blida. et Madame A. MATAOUI, Professeur à U.S.T.H.B. ALGER. et Monsieur AZZAZ Mohamed, Professeur à U.S.T.H.B. ALGER .

Je remercie aussi ma chère épouse qui m'a soutenu tout au long de ces longues années. Je ne saurais dire si j'aurai pu finir un jour mes études sans son aide précieuse et son soutien moral

Enfin, je remercie tous ceux ou celles qui m'ont donné leur soutien et leur amitié tout au long de ce travail; qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

A la mémoire de mon père et ma mère

A ma chère épouse et mes enfants

Résumé

La projection thermique est largement utilisée pour réaliser des revêtements pour différentes applications industrielles. Les revêtements sont formés par l'impact, l'étalement et la solidification des particules de revêtement fondues sur le substrat. Ainsi, les performances des revêtements sont étroitement liées à la façon dont les lamelles individuelles sont formées. La microstructure de la lamelle et l'adhérence avec le substrat sont profondément affectées par les conditions de projection, les propriétés du substrat ainsi que les particules de revêtement.

Le travail entrepris dans cette thèse, est une étude numérique qui traite le dépôt d'une particule de taille micrométrique en céramique, sur un substrat métallique sous l'effet d'un jet de haute température, le cas de la projection plasma. Cette étude est basée sur la résolution des équations de quantité de mouvement et de l'énergie avec changement de phase liquide/solide, dans un domaine 2D-axisymétrique. Ces équations sont couplées avec la méthode de volume de fluide (VOF) pour suivre la surface libre de la particule pendant son étalement et sa solidification. Le modèle proposé est implémenté dans le logiciel Ansys Fluent 14. Une comparaison avec les résultats expérimentaux publiés a été effectuée pour valider ce modèle.

Des simulations ont été exécutées pour étudier l'influence de la vitesse d'impact, de la température initiale de la gouttelette et du substrat sur la morphologie d'une gouttelette en Alumine déposé sur un substrat en acier inoxydable. Les résultats ont montré que le degré d'étalement dépend fortement de la vitesse d'impact. D'autres simulations ont été effectuées pour le cas d'une gouttelette d'alumine sur un substrat en aluminium. Dans ce cas, la fusion du substrat s'est produite, ce qui peut améliorer considérablement l'adhérence entre la lamelle et le substrat. L'effet de la taille et la température initiale de la gouttelette sur la fusion du substrat, ainsi que sur le degré d'étalement de la gouttelette ont été étudiées. Il a été observé que l'étalement de la gouttelette et la fusion du substrat sont plus importants pour les gouttelettes à température initiale élevée et de taille importante.

Mots clés :

Projection plasma, céramique, Impact de particule, solidification, fusion du substrat, CFD, VOF

Abstract

Thermal spraying is widely used to make coatings for various industrial applications. Coatings are formed by the impact, spreading and solidification of molten coating particles on the substrate. Thus, the performance of coatings is closely related to how the individual lamellae are formed. The microstructure of the coverslip and adhesion to the substrate are profoundly affected by the spray conditions, the properties of the substrate as well as the coating particles.

The work undertaken in this thesis is a numerical study which deals with the deposition of a ceramic micrometric particle, on a metallic substrate under the effect of a high temperature jet, the case of plasma projection. This study is based on solving the momentum and energy equations with liquid/solid phase change, in a 2D-axisymmetric domain. These equations are coupled with the Volume of Fluid (VOF) method to track the free surface of the particle as it spreads and solidification. The proposed model is implemented in the Ansys Fluent 14 software. A comparison with the published experimental results was carried out to validate this model.

Simulations were performed to study the influence of impact velocity, and initial droplet and substrate temperature on the morphology of an Alumina droplet deposited on a stainless steel substrate. The results showed that the spread factor strongly depends on the impact velocity. Further simulations were performed for the case of an alumina droplet on an aluminum substrate. In this case, substrate melting has occurred, which can significantly improve the adhesion between the splat and the substrate. The effect of droplet size and initial temperature on substrate melting, as well as the droplet spread factor were investigated. It has been observed that droplet spreading and substrate melting is greater for high initial temperature and large droplets.

Keywords:

Plasma projection, ceramic, Particle impact, solidification, substrate melting, CFD, VOF

Sommaire

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Sommaire	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xiii

Introduction générale	1
------------------------------	---

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction	4
I.1 Les procédés de projection thermique	4
I.1.1 Projection par combustion	5
I.1.1.1 Projection à la flamme	5
I.1.1.2 Projection à détonation (D-Gun)	6
I.1.1.3 Projection à la flamme supersonique (HVOF-HVAF)	7
I.1.2 La projection arc-fil	8
I.1.3 La Projection plasma	9
I.1.4 La Projection à froid	11
I.2 Construction du dépôt	12
I.3 Étalement de la particule après impact	15
1.3.1 Tension superficielle	15
I.3.2 Mouillabilité	16
1.3.3 Dynamique de l'étalement	17
I.3.4 Degré d'étalement	18
1.3.5 Différents types d'impact	20
I.4 Echanges thermique à l'impact	21
I.4.1 La solidification	22
I.4.2 Résistance thermique de contact	23
I.5 Fusion du substrat	24
I.5.1 Éclaboussures induites par la fusion du substrat	26
I.6 Effet des conditions de surface du substrat	27

Sommaire

I.6.1	Température de transition	27
I.6.2	La rugosité de la surface du substrat	28
I.6.3	Etat de la surface du substrat	30
I.7	Effet des paramètres de projection sur la formation des lamelles	31
I.8	Modélisation numérique de la formation des lamelles	32
I.8.1	Modélisation de l'impact, l'étalement et de la solidification des gouttelettes	32
I.8.2	Simulation numérique impliquant la fusion de substrats	36
	Conclusion	38

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

	Introduction	39
II. 1	Description du problème	39
II. 2	La dynamique de fluide	40
II. 2.1	la méthode de volume de fluide (VOF)	41
II. 2.2	Modélisation de la tension superficielle (modèle CSF)	42
II. 2.3	Adhésion à la paroi	43
II.3	Transfert de chaleur et changement de phase liquide/solide	44
II.4	Résolution numérique	47
II.4.1	Un aperçu de la méthode CFD typique	47
II.4.2	Géométrie du domaine	47
II.4.3	Maillage du domaine	48
II.4.4	Solveur	49
II.4.5	Choix des paramètres de discrétisation	50
II.4.5.1	Effet du pas d'espace	50
II.4.5.2	Effet du pas de temps	51
II.5	Validation du modèle	52
II.5.1	Cas d'impact d'une goutte d'eau sur une surface solide	53
II.5.2	Cas d'impact d'une goutte d'étain sur un substrat en acier inoxydable	55
II.5.2	Cas de fusion du substrat en acier inoxydable	58
	Conclusion	61

Sommaire

Chapitre III : Résultats et discussions

Introduction	62
III.1 Impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en acier inoxydable	62
III.1.1 Champs de pression	63
III.1.2 Champs de vitesse	66
III.1.3. Champs de température	68
III.1.4. La solidification	73
III.1.5. Le degré d'étalement	75
III.2. Effet des paramètres des gouttelettes à l'impact	77
III.2.1. Effet de la vitesse d'impact	78
III.2.2. Effet de la température initiale de la gouttelette	84
III.2.3. Effet de la température initiale du substrat	89
III.3 Impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en aluminium	95
III.3.1 Effet du diamètre initial de la gouttelette	96
III.3.2 Effet de la température initiale de la gouttelette	105
Conclusion	113
Conclusion générale	114
Références bibliographiques	116
Annexe	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Processus de revêtement par projection thermique [2].	5
Figure I.2	Schéma de principe de la projection à la flamme. Flamme à poudre (a), flamme à fils ou baguettes (b) [10].	6
Figure I.3	Schéma de principe du canon à détonation (1) Acétylène (2) Oxygène (3) Azote (4) Poudre (5) Allumeur (6) Buse (7) Substrat [10].	7
Figure I.4	Schéma de principe de la projection à la flamme supersonique (HVOF-HVAF) [10].	8
Figure I.5	Schéma de principe de la projection arc-fil [10].	9
Figure I.6	Schéma de principe de la projection plasma [10].	10
Figure I.7	Schéma de principe de la projection à froid [16].	11
Figure I.8	Microstructure de revêtement par projection thermique [2]	13
Figure I.9	Schéma de formation de la lamelle [23]	14
Figure I.10	Morphologie de la lamelle des particules de nickel projetées sur un substrat en acier inoxydable : (a) lamelle forme de disque et (b) lamelle déchiquetée [25].	14
Figure I.11	Illustration de l'équation de Laplace pour une sphère (a) et pour une calotte sphérique (b).	16
Figure I.12	Angle de contact statique apparent et tension de surface entre les milieux : gaz, liquide et solide.	17
Figure I.13	Phases d'étalement (a) et de repli (b).	18
Figure I.14	Schéma de l'impact unitaire de goutte avec solidification	19
Figure I.15	Les différents types d'impacts en fonction de la valeur du paramètre de Sommerfeld K	21
Figure I.16	Évolution au cours du temps de la température (a) et de l'enthalpie en fonction de la température (b).	22
Figure I.17	Illustration du contact d'une gouttelette et d'un substrat.	24
Figure I.18	Morphologie des éclaboussures de molybdène déposées sur l'acier inoxydable, substrats préchauffés à une température de (a) 200°C et (b) 400°C [43].	26
Figure I.19	a) schéma d'une particule de Mo impactant sur un substrat en acier inoxydable avec l'acier inoxydable fondu dans le cratère formé en dessous. (b) Morceaux de Mo détachés de la partie centrale de la gouttelette flottant sur de l'acier inoxydable fondu [43].	27
Figure I.20	: Effet de la température du substrat sur la morphologie et la force d'adhérence de la lamelle des particules de Ni sur un substrat en acier inoxydable AISI304 [52].	28
Figure I.21	Accrochage mécanique des gouttelettes sur les aspérités de la surface du substrat.	29
Figure I.22	Image obtenue par microscopie à force atomique d'un substrat d'acier inoxydable (a) à température ambiante (300 K), (b) préchauffé à 673 K [54].	29
Figure I.23	Définition du paramètre d'oblicité S_k pour différentes topographies de surface [54].	30

Chapitre II

Figure II.1	Représentation schématique des fractions de volume.	41
Figure II.2	Diagramme schématique de l'angle de contact entre les phases.	44
Figure II.3	Circuit schématique de la résistance thermique de contact [97].	46
Figure II.4	Processus typique d'une simulation CFD.	47
Figure II.5	Domaine 2D axisymétrique pour la simulation de l'impact de la gouttelette sur le substrat.	48
Figure II.6	Maillage typique pour les simulations (CPR=40).	49
Figure II.7	Test du maillage sur le degré d'étalement (a), historique de la température à la surface supérieur du substrat (b) et historique de la température à la surface supérieur de la gouttelette (c).	51
Figure II.8	Test du pas de temps sur le degré d'étalement (a), historique de la température à la surface supérieur du substrat (b) et historique de la température à la surface supérieur de la gouttelette (c), pour un CPR 40.	52
Figure II.9	Impact et étalement d'une goutte d'eau de 3 mm de diamètre avec une vitesse de $V_0 = 1,18 \text{ m/s}$, (a) simulation, (b) résultat expérimental obtenus par R.Rioboo [101].	54
Figure II.10	Evolution temporelle du degré d'étalement de la goutte d'eau de 3 mm de diamètre avec une vitesse d'impact de $V_0 = 1,18 \text{ m/s}$.	55
Figure II.11	Etalement d'une goutte d'étain de 2,7 mm de diamètre à 513K, avec une vitesse d'impact de 1 m/s un substrat en acier inoxydable initialement à 300 K, (a) étalement et distribution de la température obtenu par simulation (b) résultat expérimental [102].	57
Figure II.12	Evolution du degré d'étalement calculé [103] par rapport aux résultats expérimentaux [102], le cas l'impact d'une gouttelette d'étain de 2,7 mm de diamètre à 513 K, avec une vitesse de 1 m/s	58
Figure II.13	Etalement d'une goutte d'acier inoxydable (308), de 3.5 mm de diamètre à une température initiale de 2773 K, avec une vitesse de 1 m/s sur un substrat de même matériau à 300 K. A gauche de chaque image fraction liquide, à droite la distribution de la température et les lignes de courants.	60
Figure II.14	front de fusion dans un substrat obtenu expérimentalement (a) [104], comparé avec deux modèles numériques (b) modèle de Zarzalejo et al [104] et (c) présente étude [96].	61

Chapitre III

Figure III.1	Domaine 2D axisymétrique pour la simulation de l'impact de la gouttelette sur le substrat.	63
Figure III.2	Champs de la pression lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K. La résistance de thermique de contact à l'interface lamelle/substrat est de $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/W}$.	64
Figure III.3	Variation temporelle de la pression au point de contact avec le substrat (a), répartition de la pression le long de la surface du substrat à différents moments (b).	65

Figure III.4	Champs de vitesse et les lignes de courant dans la gouttelette et dans l'air lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.	67
Figure III.5	Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.	69
Figure III.6	Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat (a), répartition de la température le long de la surface du substrat à différents moments (b).	70
Figure III.7	Distribution de la fraction volumique (a) de l'alumine (b) de l'air le long de la surface du substrat à différents instants.	72
Figure III.8	Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.	74
Figure III.9	Fraction liquide de l'alumine le long de la surface du substrat lors de l'étalement de la gouttelette.	75
Figure III.10	Evolution temporelle du degré d'étalement de la gouttelette ainsi que son épaisseur.	77
Figure III.11	Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse d'impact de 50 m/s et 150 m/s sur un substrat en acier inoxydable à 450 K.	79
Figure III.12	Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat pour différentes vitesses initiales (a) $V_0=50$ m/s, (b) $V_0=100$ m/s, (c) $V_0=150$ m/s, (d) $V_0=200$ m/s.	80
Figure III.13	Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 50 m/s et 150 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.	82
Figure III.14	(a) Evolution temporelle du degré d'étalement pour différentes vitesses d'impact, (b) évolution temporelle de l'épaisseur de la gouttelette pour différentes vitesses, (c) variation du degré d'étalement maximale en fonction de la vitesse d'impact, (d) variation de l'épaisseur maximale en fonction de la vitesse d'impact.	83
Figure III.15	Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2400 K et 3000 K avec une vitesse de 100 m/s sur un substrat en acier inoxydable à 450 K.	85
Figure III.16	Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat pour différentes températures initiales de la gouttelette (a) $T_{g0}=2400$ K, (b) $T_{g0}=2600$ K, (c) $T_{g0}=2800$ K, (d) $T_{g0}=3000$ K.	86
Figure III.17	Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2400 K et 3000 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.	88
Figure III.18	Evolution temporelle du degré d'étalement (a) et de l'épaisseur de la gouttelette (b) pour différentes température initiales de la gouttelette. Variation du degré d'étalement maximale (c) et de l'épaisseur maximale (d) en fonction de la température initiale de la gouttelette.	89
Figure III.19	Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur un substrat en acier inoxydable à 300 K et 750 K.	91

Figure III.20	Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat pour différentes températures initiales du substrat (a) $T_{s_0}=300$ K, (b) $T_{s_0}=450$ K, (c) $T_{s_0}=600$ K, (d) $T_{s_0}=750$ K	92
Figure III.21	Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K et 750 K.	93
Figure III.22	Evolution temporelle du degré d'étalement (a) et de l'épaisseur de la gouttelette (b) pour différentes température initiales du substrat. Variation du degré d'étalement maximale (c) et de l'épaisseur maximale (d) en fonction de la température initiale du substrat.	94
Figure III.23	Domaine 2D axisymétrique pour la simulation de l'impact de la gouttelette sur le substrat.	96
Figure III.24	L'étalement et la répartition de la température d'une gouttelette d'alumine à 2800 K, de $30\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.	98
Figure III.25	Historique de la température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2800 K, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s, de différents diamètres initiaux : (a) $D_0 = 20\ \mu\text{m}$, (b) $D_0 = 30\ \mu\text{m}$ et (c) $D_0 = 40\ \mu\text{m}$	99
Figure III.26	Solidification de la gouttelette, la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2800 K, de $30\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.	101
Figure III.27	Evolution de la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2800 K, de $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s. (a) volume du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat.	102
Figure III.28	Relation entre la fusion du substrat et le diamètre initial de la gouttelette, (a) Volume maximal du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat, (c) temps de fusion et resolidification du substrat ainsi que le temps de solidification de la gouttelette.	104
Figure III.29	Evolution du degré d'étalement lors de l'impact d'une gouttelette d'alumine à 2800 K, de $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse de 150 m/s.	105
Figure III.30	L'étalement et la répartition de la température d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre à 2600 K et 3000 K, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.	106
Figure III.31	Historique de la température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s, pour différentes température initiales : (a) $T_0 = 2600$ K, (b) $T_0 = 2800$ K et (c) $T_0 = 3000$ K	107
Figure III.32	Solidification de la gouttelette, la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre à 2600 K et 3000 K, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.	109

Figure III.33	Evolution de la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2600 K, 2800 K et 3000 K de 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s. (a) volume du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat.	111
Figure III.34	Relation entre la fusion du substrat et la température initiale de la gouttelette, (a) Volume maximal du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat, (c) temps de fusion et resolidification du substrat ainsi que le temps de solidification de la gouttelette.	112
Figure III.35	Evolution du degré d'étalement lors de l'impact d'une gouttelette d'alumine à 2600 K, 2800 K et 3000 K de 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse de 150 m/s.	112

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1	les principales caractéristiques des techniques de projection thermique [3].	12
-------------	--	----

Chapitre II

Tableau II.1	Facteur de sous relaxation.	50
Tableau II.2	Propriétés physiques de l'eau.	53
Tableau II.3	Propriétés physiques de l'étain et du substrat en acier inoxydable.	55

Chapitre III

Tableau III.1	Propriétés physiques de la gouttelette d'alumine (Al_2O_3) et du substrat en acier inoxydable (304L).	63
Tableau III.2	Paramètres a et b pour exprimer le degré d'étalement maximal en fonction du nombre de Reynolds ($Re = 390$)	76
Tableau III.3	Propriétés thermo physiques de la gouttelette et le substrat.	96

Introduction générale

Introduction générale

La projection thermique est largement utilisée dans l'industrie, dans des domaines très variés comme l'aéronautique, le spatial, la mécanique, la chimie, la biomédical, la marine et l'automobile... Ce procédé permet de réaliser des revêtements de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres d'épaisseur de métaux, d'alliages, de céramiques et de cermets. Ces revêtements sont choisis pour leur résistance à la corrosion, à l'oxydation, à l'usure et à la haute température. Fondamentalement, les revêtements sont formés de particules fondues impactent et s'étalent sur le substrat pour former des lamelles. Ainsi, la qualité de l'adhérence entre le dépôt et le substrat ou entre les lamelles qui constituent le dépôt est étroitement lié à la façon dont les lamelles individuelles sont formées. Les paramètres liés à la particule (sa taille, sa vitesse, sa température, son état de fusion à l'impact, et ses propriétés thermo-physiques) et les paramètres liés au substrat (ses propriétés, son état de surface, sa température de préchauffage et la présence éventuelle d'oxydes sur sa surface) ont une influence considérable sur la formation d'une lamelle.

Les valeurs très élevées de température et de vitesse des particules fondues, qui impactent sur la surface à revêtir, s'étalent en 1 à 2 μs et solidifient en 2 à 10 μs . Ces conditions rendent difficile l'étude de la formation d'une lamelle individuelle avec les outils expérimentaux (caméras rapides, pyromètres, thermocouples, etc.). Ceci pénalise l'optimisation du développement des matériaux réalisés par ce procédé. En connaissant les phénomènes physiques qui interviennent dans ce procédé, il est donc possible de les modéliser et réaliser des expériences numériques, et ainsi suivre la formation de cette microstructure particulière. Des modèles numériques ont été développés pour mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent lors de la formation d'une lamelle. Ils devraient permettre de choisir judicieusement les paramètres clés contrôlant la formation d'une lamelle et celle d'un dépôt, en vue de leur utilisation dans des domaines de pointe telle que l'aérospatiale.

Cette étude apporte une contribution à l'étude numérique de la construction de dépôt dans le cadre de la projection plasma. Le modèle proposé a pour objectif de simuler l'impact d'une gouttelette micrométrique en céramique sur un substrat métallique, dans les conditions

Introduction générale

de projection plasma. Le modèle prend en charge la résolution des équations de Navier – Stokes et l'équation de l'énergie en incluant le changement de phase liquide/solide, par la méthode CFD dans un domaine 2D axisymétrique, en utilisant le logiciel ANSYS FLUENT 14. Dans un premier temps, le modèle sera utilisé pour étudier l'étalement et la solidification lors de l'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en acier inoxydable. L'effet de la vitesse initiale d'impact, la température initiale de la gouttelette et du substrat sur la formation de la lamelle sera étudié. Ensuite, la fusion du substrat sera étudiée dans le cas d'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en aluminium. L'influence de la taille et la température initiale de la gouttelette sur son étalement et sa solidification, ainsi que sur la fusion du substrat sera pris en compte.

Dans un premier chapitre, un rappel succinct des différentes techniques de projection thermique sera présenté, en justifiant le choix de la projection plasma comme procédé de déposition adéquat. Une synthèse des différents phénomènes physiques intervenant dans la construction du dépôt sera discutée aussi. La fusion du substrat et les effets des conditions de surface du substrat, ainsi que les paramètres de projections sur la formation du dépôt seront abordés dans cette partie. En dernier, quelques modèles développés qui tiennent compte des aspects hydrodynamiques de la formation de la lamelle et du transfert thermique dans le système lamelle-substrat seront exposés.

Le deuxième chapitre est dédié à la mise en équations du problème physique étudié et sa résolution numérique. Les hypothèses principales retenues pour le développement du modèle seront présentées. La formulation mathématique du modèle, qui consiste à résoudre les équations de Navier – Stokes et l'équation de l'énergie en incluant le changement de phase liquide/solide sera traitée en détail. Ces équations seront couplées avec la méthode du volume de fluide (VOF) pour suivre la surface libre de la gouttelette pendant son étalement et sa solidification. Le choix des paramètres de discrétisation de ces équations, ainsi que le solveur utilisé seront présentés aussi. Une comparaison avec les résultats expérimentaux publiés sera discutée afin de valider le modèle numérique proposé.

Dans le dernier chapitre de cette thèse, les principaux résultats numériques simulant la formation des lamelles céramiques sur des substrats métalliques seront présentés et discutés. Ce chapitre est composé de deux parties. Dans la première partie, les résultats de la simulation de l'impact, l'étalement et la solidification d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat

Introduction générale

en acier inoxydable seront discutés. Dans la même partie, une étude paramétrique sera faite, pour examiner l'influence de la vitesse d'impact, température initiale de la gouttelette et du substrat sur la formation des lamelles. Dans la deuxième partie, les effets de la taille et la température initiale de la gouttelette sur la fusion du substrat ainsi que sur l'impact, l'étalement et la solidification d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) impactant un substrat en aluminium seront discutés.

La conclusion générale synthétisera les résultats numériques obtenus par le modèle proposé. Quelques perspectives de ce travail seront proposées à la fin de cette thèse.

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction

La technique de projection thermique est largement utilisée pour réaliser des revêtements. Ces derniers sont produits pour des propriétés de surface bien particulières, qui sont utilisés pour des applications industrielles variées. Les revêtements sont formés lorsque les particules fondues impactent et s'étalent sur le substrat pour former des lamelles et qui s'empilent les unes sur les autres. Ainsi, la qualité des revêtements est étroitement liée à la manière dont les lamelles individuelles sont formées. La microstructure du revêtement est profondément affectée par les conditions de projection, la surface du substrat, les conditions des particules. Ce chapitre présente les différents procédés de projections thermiques, la microstructure des revêtements et les phénomènes physiques intervenant dans la formation des lamelles. Enfin les modèles numériques utilisés pour prédire la formation des lamelles existants dans la littérature scientifique seront exposés.

I.1 Les procédés de projection thermique

La projection thermique est une technique de revêtement, qui consiste à déposer des particules de matériaux de revêtement à haute température sur un substrat. La projection thermique est largement utilisée dans l'industrie, comme l'aéronautique, le spatiale, l'automobile, l'électronique, biomédicale, etc. Une gamme de techniques de projection thermique peut être utilisée pour former des revêtements de hautes performances avec une épaisseur supérieure à 50 μm sur divers substrats. Les revêtements peuvent protéger les substrats contre l'usure, la corrosion, l'oxydation, les hautes températures, etc. Avec une large gamme de matériaux applicables, à la fois comme matériaux de revêtement et comme substrat [1-4].

Les techniques de projection thermique comprennent trois étapes principales. Initialement, les particules solides de taille micrométrique sont chauffées, à l'état semi-fondu ou fondu. Le matériau chauffé est ensuite propulsé sur la cible (substrat). Lors de l'impact, et en raison de l'énergie cinétique élevée, les gouttelettes s'aplatissent et s'adhère à la surface du substrat. La chaleur des gouttelettes chaudes est rapidement transférée vers le substrat, ce qui entraîne le refroidissement et la solidification rapide des gouttelettes. Ces particules individuelles aplaties sont appelées «lamelle, splat en anglais», qui s'accumulent sur le substrat ou les couches précédemment déposées pour former un revêtement lamellaire (Figure I.1). Les matériaux utilisés dans le revêtement par projection thermique vont des polymères

Chapitre I : Etude bibliographique

aux céramiques, aux métaux et à leurs alliages. Les matériaux de revêtement peuvent être sous forme de poudres, de tiges ou de fils, les poudres étant la forme la plus courante. Les tailles de particules sont généralement comprises entre 5 μm et 100 μm . Les revêtements sont principalement appliqués sur des substrats métalliques [2, 5-6].

Ces procédés peuvent être regroupés en quatre catégories selon la source de chaleur utilisée pour fondre et propulser le matériau: projection par combustion, projection par arc électrique, projection plasma et projection à froid. Les caractéristiques de certains processus importants sont résumées dans le tableau I.1.

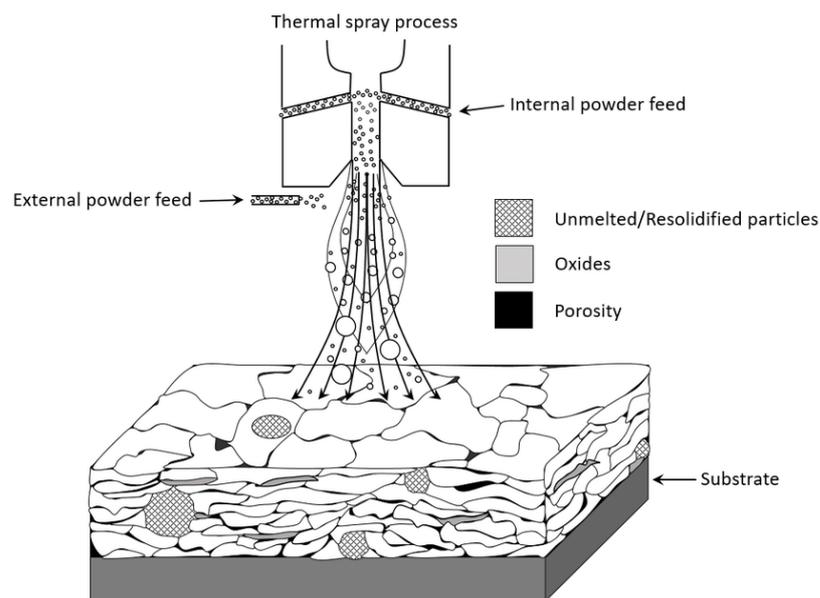


Figure I.1 : Processus de revêtement par projection thermique [2]

I.1.1 Projection par combustion

Les procédés de projection par combustion sont divisés en trois sous-groupes : la projection à flamme, la projection par détonation et les procédés à grande vitesse.

I.1.1.1 Projection à la flamme

La projection à la flamme est une technique largement employée dans le monde compte tenu de sa simplicité et de son faible coût d'équipement. Les pistolets à flamme sont principalement utilisés pour projeter les matériaux sous forme de poudre, de fils ou de baguettes. Le principe est fondé sur l'introduction du matériau à déposer dans la flamme

Chapitre I : Etude bibliographique

(Figure I.2). Avec les poudres, la température de fusion du matériau peut être au mieux d'environ 70% de la température de la flamme, tandis qu'avec les tiges ou les cordes, elle correspond à 90–95% de la température de la flamme. Les principaux mélanges de gaz utilisés pour la combustion sont : acétylène/oxygène, hydrogène/oxygène ou propane/oxygène. Ils permettent d'atteindre des températures de flamme de 3200°C, 2700°C et 2400°C respectivement. La puissance moyenne d'une torche est d'environ 40 kW, mais leur vitesse est relativement faible (<100 m/s), ce qui se traduit par une faible adhérence (<30 MPa) et une porosité élevée du dépôt (> 10% en volume) [2,7].

Les premiers matériaux utilisés étaient le plomb et le zinc pour des applications de protection anticorrosion. Depuis, la gamme des matériaux ainsi que les applications ont été élargies. Des métaux pur comme Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, des aciers y compris des aciers inoxydables, des alliages à base de Zn, Cu, Ni ou Sn, mais aussi des polymères peuvent être utilisés comme matériaux d'apport sous forme de poudre ou en fils. Des céramiques Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$, Cr_2O_3 , ZrO_2-CaO sous forme de cordons ou de baguettes peuvent être aussi déposées en utilisant cette technique [8, 9] .

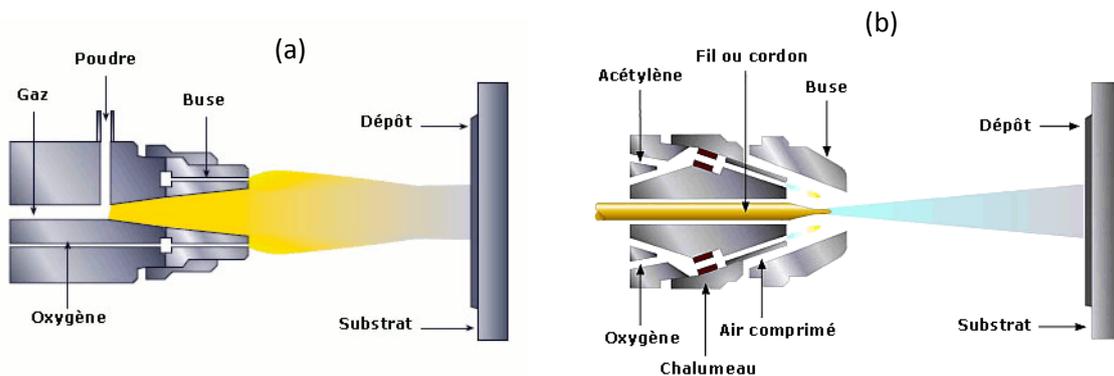


Figure I.2 : Schéma de principe de la projection à la flamme. Flamme à poudre (a), flamme à fils ou baguettes (b) [10].

I.1.1.2 Projection à détonation (D-Gun)

Le matériau d'apport, sous forme de poudre, et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits pratiquement en même temps dans un tube (tube de détonation) fermé à une extrémité. Grâce à une étincelle le mélange de gaz explose créant une onde de choc maintenue par la combustion (Figure I.3). L'évacuation du gaz brûlé, l'introduction du

Chapitre I : Etude bibliographique

gaz explosif frais ne permet de renouveler l'explosion que jusqu'à 8 fois par seconde. Les particules de poudres sont ainsi chauffées et éjectées à une grande vitesse (jusqu'à 900-1300 m/s). Les dépôts obtenus sont compacts (porosité inférieure à 1 %), de bonne adhérence (généralement supérieure à 80 MPa) [11]. Pour ces raisons, la projection à détonation est utilisée pour réaliser des revêtements résistants à l'usure tels que ceux appliqués aux moteurs d'avion à réaction. Les matériaux généralement utilisés sont les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique (Ni, Co) [12,13].

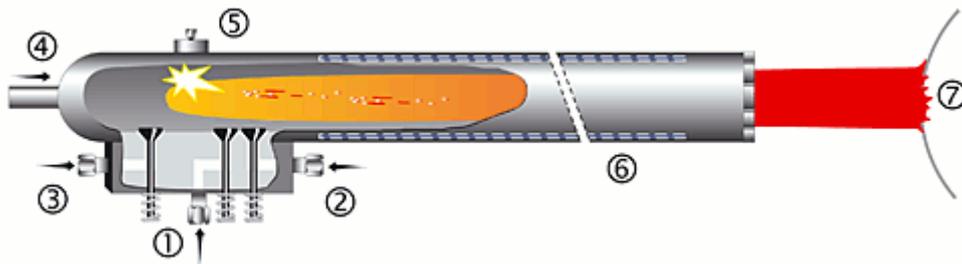


Figure I.3 : Schéma de principe du canon à détonation (1) Acétylène (2) Oxygène (3) Azote (4) Poudre (5) Allumeur (6) Buse (7) Substrat [10].

I.1.1.3 Projection à la flamme supersonique (HVOF-HVAF)

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion. Les processus à grande vitesse sont en outre subdivisés en pulvérisation à haute vitesse à oxygène-carburant (HVOF) et à haute vitesse à air-carburant (HVAF). Dans un processus HVOF, le gaz combustible (comme l'acétylène, le propane ou l'hydrogène) ou liquide (comme le kérosène) est brûlé avec de l'oxygène à haute pression et crée un jet d'échappement à très grande vitesse qui propulse les particules vers le substrat (Figure I.4). La poudre est introduite dans le jet de combustion qui fonctionne à des températures de 2500 ° C à 5300 ° C. La vitesse de la particule varie de 200 à 1000 m/s [1]. Le revêtement formé présente une faible porosité (inférieur à 2%) et une résistance de liaison élevée (70-90 MPa). L'énergie cinétique très élevée des particules frappant la surface du substrat ne nécessite pas que les particules soient complètement fondues pour former des revêtements de haute qualité. Une température plus basse des particules, comparée à la pulvérisation au plasma, a réduit le degré d'oxydation des particules pendant le vol. Dans le système HVAF, de l'air comprimé est utilisé à la place de l'oxygène comprimé comme dans le système HVOF. Cette substitution peut réduire considérablement les coûts d'exploitation.

Chapitre I : Etude bibliographique

La température de la flamme dans le procédé HVAF est bien inférieure à celle du procédé HVOF, conduisant à un degré d'oxydation plus faible dans les revêtements HVAF [13]. Ce procédé permet de déposer des métaux (Ni, Co, Mo, Cr), des alliages (Inconel, MCrAlY, NiCr), des alliages auto-fusibles, mais aussi des carbures (WC-Co, TiC-Ni). Les applications sont les protections anticorrosion et anti-usure, les barrières thermiques, mais également la réparation, avec des dépôts de fortes épaisseurs en plusieurs passes [14].

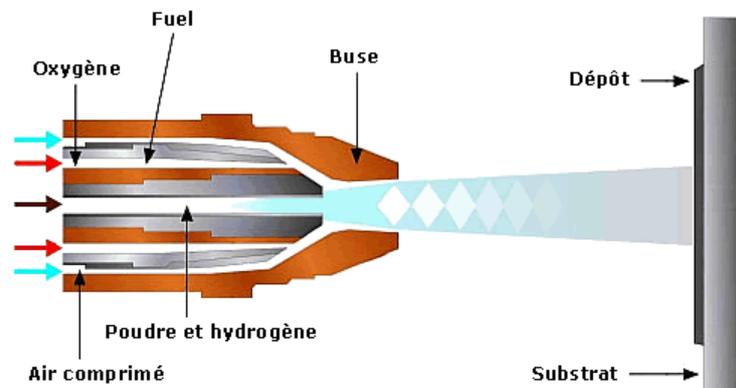


Figure I.4 : Schéma de principe de la projection à la flamme supersonique (HVAF-HVOF) [10].

I.1.2 La projection arc-fil

Dans ce procédé, un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat. La tension appliquée entre ces deux fils varie entre 18 et 40 V pour des intensités de courant comprises entre 100 et 500 A. Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant (Figure I.5). L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPa. L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Les matériaux projetés doivent être conducteurs électriques et tréfilables (zinc, aluminium, cuivre, molybdène et acier), l'utilisation des fils fourrés constitués d'une gaine métallique ductile garnie de poudres de matériaux non-ductiles permet de réaliser des dépôts d'alliages (NiCrAl, NiMoAl, FeCrMn) ou des dépôts métalliques renforcés par des céramiques [15].

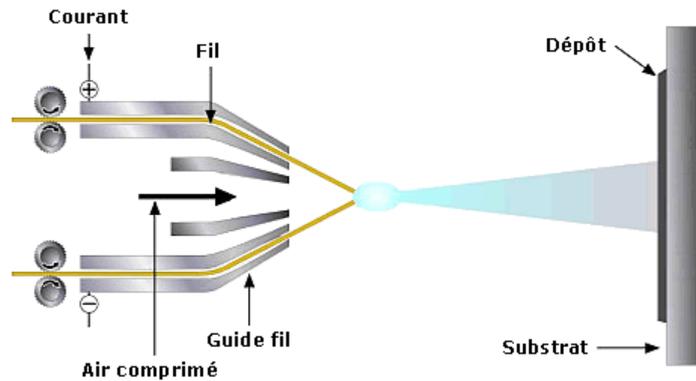


Figure I.5 : Schéma de principe de la projection arc-fil [10].

I.1.3 La Projection plasma

Avec des températures supérieures à 8 000 K, tout matériau métallique, céramique ou cermet sous forme de poudre, avec des particules de taille inférieure à 100 μm peut être fondu. Pour générer le plasma, un gaz inerte généralement de l'argon ou un mélange argon-hydrogène est surchauffé par un arc électrique à courant continu ou une décharge radiofréquence. La décharge électrique se produit entre l'anode et la cathode dans la torche de projection grâce à un générateur du courant continu. Le gaz plasmagène est injecté entre les électrodes où l'arc électrique est produit. Le gaz subit une dissociation moléculaire (pour l'hydrogène) et/ou une ionisation partielle qui produit d'une forte expansion et une détente du jet de plasma en sortie de tuyère (Figure I.6). Les deux électrodes sont refroidies par eau sous une pression de 1,5 MPa environ. La vitesse du jet plasma à la sortie de la tuyère est élevée (de l'ordre de 600 à 2000 m/s) mais reste subsonique en raison de la température du jet plasma (8000 à 14000 K). Les particules solides sont introduites perpendiculairement dans le jet plasma à l'aide d'un gaz porteur et sont accélérées et fondues (ou partiellement fondues) dans l'écoulement. La gamme de vitesse des particules, pour un même matériau et pour une distribution granulométrique comprise entre 25 et 45 μm , varie de quelques dizaines de m/s jusqu'à 300 m/s selon les conditions opératoires et les trajectoires suivies par les particules dans le jet de plasma. Les porosités du revêtement pulvérisé au plasma sont comprises entre 2 et 8 %, la teneur en oxygène des revêtements métalliques ou alliés étant comprise entre 1 et 5% en poids et leur adhérence est bonne (> 40–50 MPa). Ils sont principalement utilisés pour pulvériser des oxydes. Cependant, ils présentent une bonne résistance à l'abrasion, à l'adhésif,

Chapitre I : Etude bibliographique

Ils produisent également des surfaces thermiquement conductrices ou résistantes. Ils sont utilisés pour la récupération et restauration des surfaces usées. La projection s'effectue en général à l'air libre, à la pression atmosphérique (Air Plasma Spraying : APS) et l'inclusion d'oxydes dans les dépôts métalliques réalisés par cette technique, est inévitable [2,4]. Afin de réduire le taux d'oxydation de ces dépôts, on adopte la technique de projection sous gaz inerte (Inert Plasma Spraying : IPS) ou sous une pression en dessous de la pression atmosphérique (10 à 50 kPa) (Vacuum Plasma Spraying : VPS).

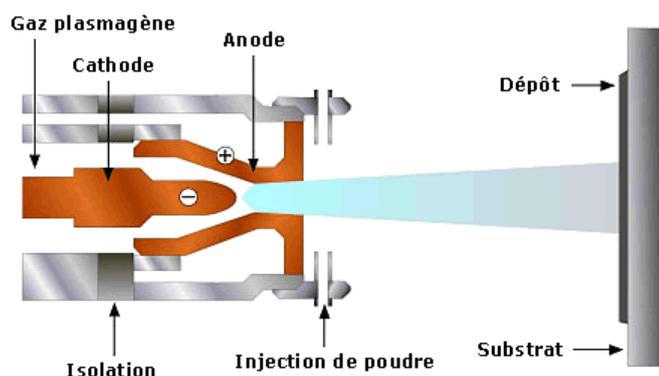


Figure I.6 : Schéma de principe de la projection plasma [10].

L'IPS (Inert Plasma Spraying) ou la projection plasma sous atmosphère inerte, elle permet d'améliorer la qualité du dépôt et son adhérence. Lorsque l'oxydation est un problème, les métaux à température de fusion élevée et les céramiques non oxydées ne peuvent être pulvérisés qu'en atmosphère inerte (chambre remplie d'argon), à la pression atmosphérique ou légèrement au-dessus [16].

Dans le procédé VPS, la projection se déroule dans une atmosphère contrôlée est à une pression inférieure à la pression atmosphérique (dans la gamme des dizaines de kPa). Selon l'expansion du jet de plasma, la température ambiante moyenne dans la chambre est supérieure à 200 ° C. L'équipement est plus complexe que celui de l'IPS, est par conséquent le plus coûteux de tous les procédés. Lors de l'étape de dépôt, la pièce est chauffée à une température suffisamment élevée pour réaliser une liaison par diffusion entre le métal ou alliage projeté et le substrat. Ce procédé est utilisé pour les pièces à haute valeur ajoutée, comme les aubes de turbine [16].

I.1.4 La Projection à froid

La projection à froid ou la projection cinétique est un processus dans lequel la matière première en poudre est entraînée par un gaz comprimé (azote ou hélium) sans être fondue avant l'impact sur le substrat. Après avoir atteint une buse convergente-divergente (Figure I.7), les gaz comprimés se détendent pour atteindre une vitesse supersonique jusqu'à 1500 m/s. Les particules sont injectées dans la buse et accélérées à grande vitesse. Cette vitesse facilite une augmentation de la température locale lors de l'impact, lorsque l'énergie cinétique des particules est convertie en énergie thermique et de déformation. La température locale est suffisamment élevée pour que le matériau puisse former un revêtement dense. La température maximale des particules dans ce procédé est de 750 ° C, soit la plus basse de toutes les méthodes de projection. En conséquence, la technique produit des revêtements à faible teneur en oxyde, bonne adhérence (26-44 MPa pour le Cu et 33–35 MPa pour l'Al), faible porosité (4.5% pour le Cu et 3.7% pour l'Al) [17]. Les basses températures aident également à conserver les propriétés chimiques initiales de la poudre. Cependant, la technique de projection à froid ne peut être utilisée que pour les matériaux ductiles tels que l'aluminium, l'acier inoxydable, le cuivre, le titane et les alliages. Les matériaux durs et cassants comme les céramiques ne peuvent pas être pulvérisés à l'état pur, mais peuvent être appliqués sous forme de composites avec une phase à matrice ductile. La première application très réussie a été la métallisation du cuivre [2, 4, 18].

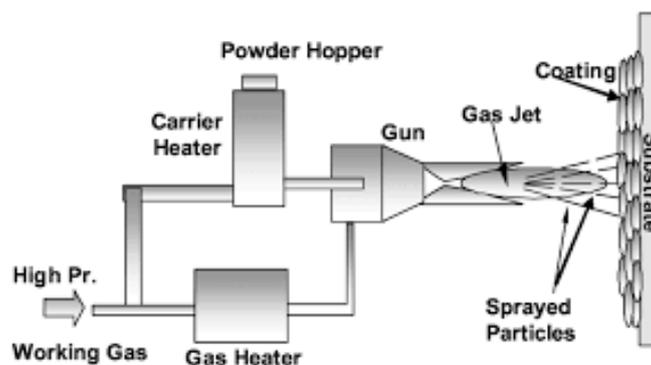


Figure I.7 : Schéma de principe de la projection à froid [16].

Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I.1 les principales caractéristiques des techniques de projection thermique [3].

Caractéristique	Projection à la flamme	HVOF	projection à froid	APS	VPS
Température du jet (°C)	2500	2500-5300	450-750	6000-15000	6000-12000
Vitesse du jet (m/s)	50-100	200-1000	400-1500	300-1000	200-600
Température des particules (°C)	2000	610-3000	350-750	>3500	>3500
Vitesse des particules (m/s)	50-100	200-1000	400-1000	200-800	200-600
Force d'adhérence (MPa)	7-18	68		<68	>68
Oxydation	élevée, 6%	Modérée, 0,2%	Faible	Modérée à élevée, 0,2% -1%	Aucune

Les données du tableau I.1 montrent que la technique de projection plasma (APS, VPS) présente un bon compromis température des particules/vitesse des particules. Les vitesses acquises par les particules qui sont fondues en grande majorité (si les conditions opératoires sont adéquates) permettent un bon étalement des gouttelettes sur le substrat et une bonne adhérence de dépôt.

I.2 Construction du dépôt

En projection thermique, les dépôts sont formés par empilement successif de lamelles individuelles écrasées sur un substrat solide ou sur des lamelles déjà solidifiées et dont l'épaisseur varie de 0,8 à 4 μm . La microstructure des dépôts ainsi réalisés et donc leurs propriétés dépendent essentiellement des mécanismes d'étalement de la matière fondue sur le substrat, de sa cinétique de refroidissement et de solidification et du contact des lamelles avec le substrat et entre elles [19]. Il faut savoir que les applications industrielles exigent généralement une bonne adhérence du dépôt au substrat ainsi qu'une bonne cohésion (adhérence entre les lamelles déposées). Les caractéristiques comme les propriétés thermomécaniques et électriques sont liées à la qualité de contact entre les différentes

Chapitre I : Etude bibliographique

lamelles empilées et à l'architecture du dépôt [20, 21]. La figure I.8 présente une structure typique du revêtement. Au sein de la structure, les caractéristiques inter-lamellaires telles que la porosité, les oxydes, les débris, les fines périphériques des particules et des particules non fondues sont présentes [2].

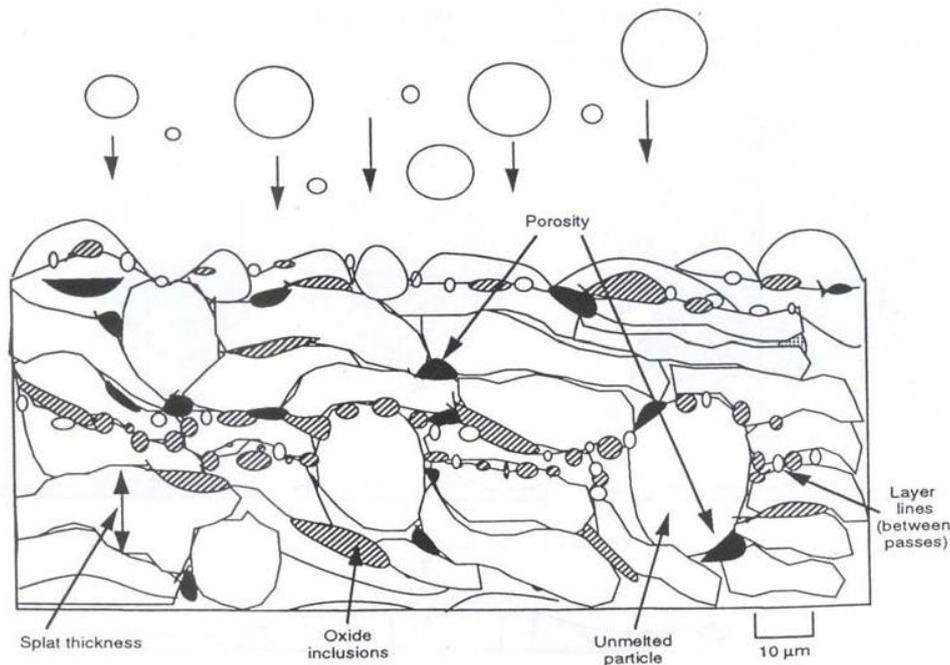


Figure I.8 : Microstructure de revêtement par projection thermique [2]

En raison de leur énergie cinétique élevée, les particules projetées se déforment lors de l'impact avec le substrat et s'étalent dans les directions radiales pour former des lamelles. La chaleur de la lamelle est transférée vers le substrat, ce qui entraîne sa solidification rapide (Figure I.9). La formation des lamelles est contrôlée, d'une part, par leur vitesse d'impact, leur taille, leur état de fusion, leur viscosité et leur état chimique, et d'autre part, par des paramètres propres au substrat: sa nature, son état de surface, la couche d'oxyde formée à la surface des substrats métalliques (épaisseur, composition, rugosité aux échelles micrométriques et nanométriques), sa température, sa réactivité de surface [5, 6, 22]. Le refroidissement de la lamelle s'effectue essentiellement par conduction vers le substrat ou la couche déjà déposée. Le taux d'évacuation de la chaleur dépend, de l'enthalpie de la goutte à l'impact, de la qualité du contact à l'interface, de l'épaisseur de la lamelle et des propriétés thermo-physiques du couple des matériaux lamelle/substrat.

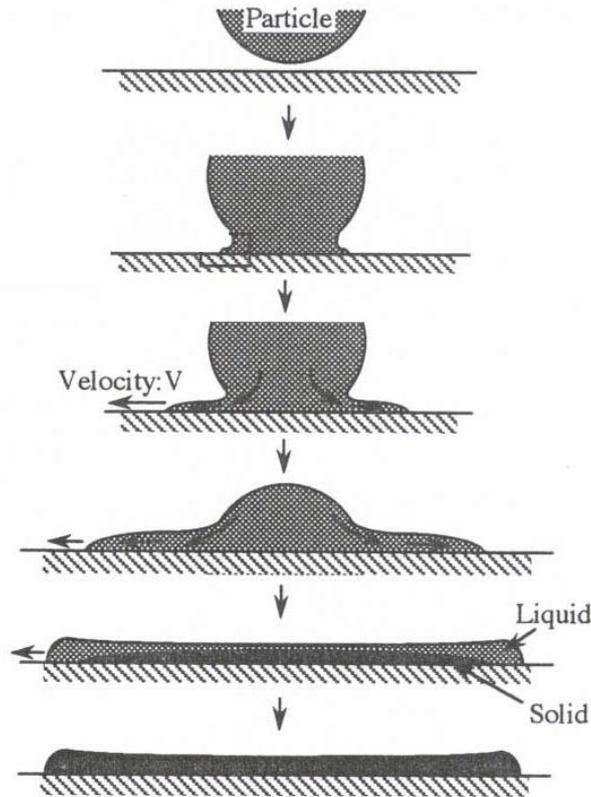


Figure I.9 : Schéma de formation des lamelles [23]

Deux types de formes de lamelle couramment observées dans les revêtements par projection thermique, sont lamelle forme de disque et lamelle déchiqueté (Figure I.10). Les lamelles en forme de disque améliorent la qualité des revêtements avec une adhérence et une cohésion élevées, une faible porosité et un faible gaspillage de matériau de dépôt. En revanche, les revêtements formés à partir des lamelles déchiquetés ont une adhérence et une cohésion médiocres, et une porosité élevée [24, 25].

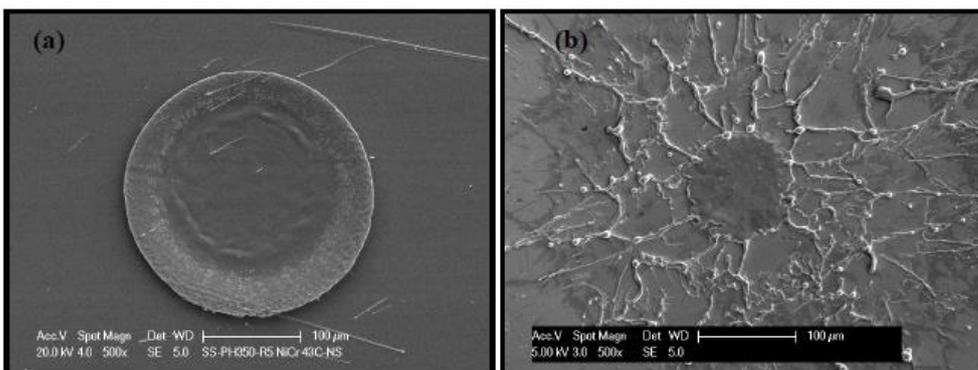


Figure I.10 : Morphologie de la lamelle des particules de nickel projetées sur un substrat en acier inoxydable : (a) lamelle forme de disque et (b) lamelle déchiqueté [25].

I.3 Étalement des gouttelettes

L'étalement de la gouttelette est régi essentiellement par les conditions à l'impact de la gouttelette (vitesse, taille, température, propriétés thermo-physiques...), et du substrat (état de surface, température, propriétés thermo-physiques...) et de la mouillabilité au contact gouttelette/substrat. Lors de l'étalement d'une gouttelette sur une surface solide, deux scénarios peuvent se produire :

- a) la goutte s'étaler jusqu'à son diamètre maximum d'équilibre et se figer dans cette position,
- b) s'étaler puis se rétracter jusqu'à reformer une sphère plus ou moins complète et n'avoir ainsi qu'un contact ponctuel avec la surface.

1.3.1 Tension superficielle

La tension superficielle est à l'origine de la conservation de la forme sphérique de la gouttelette dans un fluide ambiant. Cette tension est l'énergie superficielle entre deux milieux qui tend à minimiser la surface d'interface entre ces deux milieux. Du point de vue chimique, cela est dû aux interactions moléculaires entre deux milieux non-miscibles. Du point de vue physique, l'équilibre des forces de pression est dû principalement à la tension de surface. Laplace définit cet équilibre géométrique par une relation liant la différence de pression ΔP entre le milieu contenu dans la sphère de rayon R et le milieu extérieur, et la tension de surface σ (Figure I.11a)

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (I.1)$$

Pour le cas de la calotte sphérique formée par la goutte en contact avec le substrat la pression de Laplace s'exprime en fonction des rayons de courbure principaux R_1 et R_2 (Figure I.11b).

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (I.2)$$

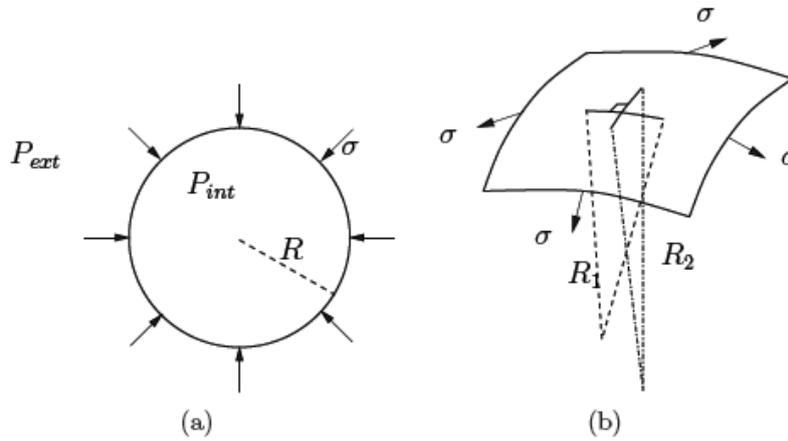


Figure I.11 : Illustration de l'équation de Laplace pour une sphère (a) et pour une calotte sphérique (b).

I.3.2 Mouillabilité du substrat

La gouttelette est uniquement en contact avec le gaz ambiant avant l'impact, la force de tension de surface minimise l'interface entre la gouttelette et le gaz. La particule liquide forme ainsi une sphère. Un troisième milieu (le substrat) intervient après l'impact, ce qui provoque un déséquilibre de l'énergie de surface de la gouttelette. Un nouvel équilibre se met en place, ce phénomène est appelé la mouillabilité. La goutte liquide en contact avec le substrat solide dans un gaz environnant peut adopter différents comportements : se détacher de la surface (le contact est non mouillant) ou s'étaler pour recouvrir l'ensemble de la surface (le contact est mouillant).

Chaque milieu exerce une force sur le milieu voisin. σ_{GL} (ou σ) est la force interfaciale exercée par le gaz sur le liquide, σ_{SL} est la tension appliquée exercée par le solide sur le liquide, et, σ_{SG} est la tension exercée par le solide sur le gaz. Ces trois forces entrent en compétition le long de la ligne triple. La direction de la résultante de ces trois forces forme un angle avec la surface du substrat [26]. Cet angle est appelé angle de contact. Lors de l'étalement de la gouttelette la valeur de cet angle est variable et elle atteint après étalement final une valeur appelée angle de contact statique θ_a . La loi d'Young-Laplace définit l'angle de contact statique θ_a au niveau de la ligne triple statique par l'équation 1.3 :

$$\cos\theta_a = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{LS}}{\sigma_{GL}} \tag{1.3}$$

Chapitre I : Etude bibliographique

Les valeurs de θ_a pour chaque régime de mouillabilité sont définis par De Gennes et al. [26] tel que :

- $0^\circ \leq \theta_a \leq 60^\circ$ → mouillant
- $60^\circ \leq \theta_a \leq 120^\circ$ → partiellement mouillant
- $120^\circ \leq \theta_a \leq 180^\circ$ → non mouillant

La goutte en contact avec le substrat est considérée comme une calotte sphérique. Dans ce cas, Lorsque la gravité est négligeable l'angle de contact apparent est obtenu par le calcul de la tangente à la ligne triple telle que :

$$\tan\left(\frac{\theta_a}{2}\right) = \frac{h}{r} \tag{I.4}$$

Où h est la hauteur de la calotte et r est le rayon de cette calotte (Figure I.12).

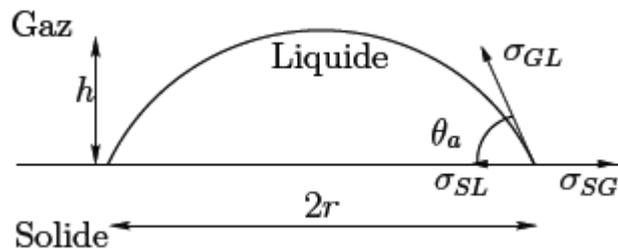


Figure I.12 : Angle de contact statique apparent et tension de surface entre les milieux : gaz, liquide et solide.

1.3.3 Dynamique de l'étalement de la gouttelette

Lorsqu'une gouttelette possédant une énergie cinétique, impactant un substrat perpendiculairement, l'effet de la mouillabilité entre en jeu dès le moment du contact et ceci jusqu'à l'étalement total. Deux phases se distinguent lors de l'impact d'une gouttelette.

Dans un premier temps, l'énergie cinétique de la gouttelette est supérieure aux forces de tension de surface ce qui permet l'étalement de la gouttelette sur substrat (Figure I.13(a)). L'énergie cinétique démunie par dissipation visqueuse, à cet instant, les forces de tension s'opposent au mouvement d'étalement de la gouttelette qui tend à augmenter la courbure de

l'interface. L'angle de contact joue un rôle important sur l'inclinaison de la surface à l'extrémité de la lamelle donc l'angle de contact influence l'effet d'opposition des tensions de surface sur l'écoulement. Lorsque l'énergie cinétique devient nulle, le liquide se replie vers le centre de la lamelle comme illustré sur la Figure I.13(b).

Dans un deuxième temps, à l'impact, l'angle de contact égale 180° . Pendant l'étalement de la gouttelette, cet angle va diminuer pour atteindre un minimum lorsque l'étalement est maximal. Puis en phase de recul, l'angle de contact va ré-augmenter sous l'effet des tensions superficielles. Nous parlons ainsi d'angle de contact dynamique. Un état d'équilibre qui met en évidence un angle de contact statique est ensuite obtenu.

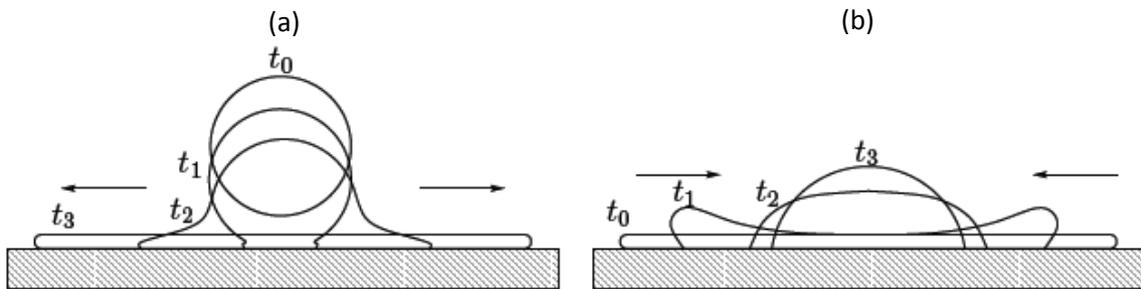


Figure I.13 : Phases d'étalement (a) et de repli (b).

I.3.4 Le degré d'étalement de la gouttelette

La notion de degré maximal d'étalement de la gouttelette (ξ_{max}) a été introduite par Madejski [27]. Il est défini comme étant le rapport entre le diamètre de la surface de contact entre la lamelle et le substrat D_{max} et le diamètre initial de la gouttelette avant impact D_0 (Equation 1.5).

$$\xi_{max} = \frac{D_{max}}{D_0} \tag{1.5}$$

Les travaux de Madejski [27] ont montré que le degré d'étalement peut être exprimé comme une fonction du nombre de Reynolds ($Re = \frac{\rho_g V_0 D_0}{\mu_g}$, avec ρ_g et μ_g la masse volumique et la viscosité dynamique de la goutte et V_0 la vitesse de la goutte avant impact comme défini sur la Figure I.14) lorsque $Re > 100$, voir équation 1.6.

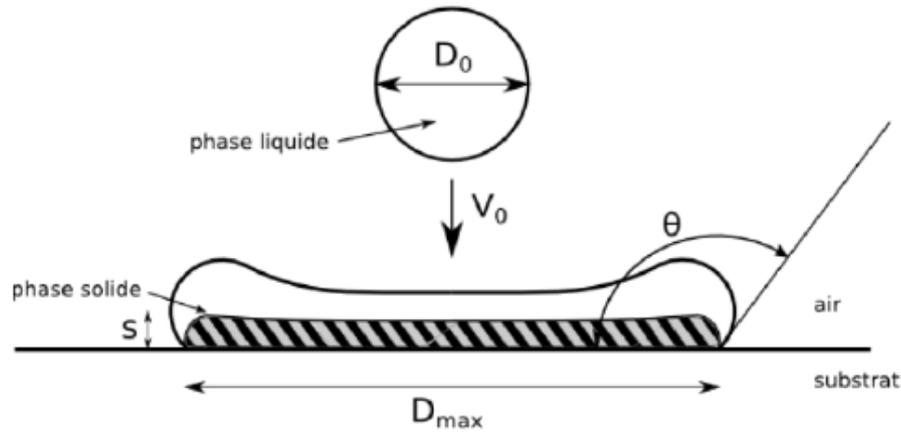


Figure I.14 : Schéma de l'impact unitaire de goutte avec solidification.

$$\xi_{max} = aRe^b \tag{I.6}$$

Où a et b sont des constantes, avec a variant de 0,50 à 1,29 et b variant de 0,125 à 0,250 en fonction des matériaux utilisés.

Dans le cas général où $Re > 100$, et $We > 100$, Madejski [27] exprime le degré d'étalement en fonction du nombre de Reynolds (Re) et du nombre de Weber ($We = \frac{\rho g D_0 V_0^2}{\sigma}$ avec σ la tension superficielle) par l'équation 1.7.

$$\frac{3\xi_{max}^2}{We} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\xi_{max}}{1.2641} \right)^5 = 1 \tag{I.7}$$

Pasandideh Fard et al. [28] ont défini le degré d'étalement en prenant en considération la solidification de la gouttelette pendant son étalement. Il ont exprimé le degré d'étalement comme une fonction de Re , We , θ_c (angle de contact) et s^* (l'épaisseur de la lamelle solidifiée adimensionnée telle que $s^* = s/D_0$ avec s l'épaisseur de la couche solidifiée), voir équation 1.8.

$$\xi_{max} = \sqrt{\frac{We + 12}{\frac{3}{8}Wes^* + 3(1 - \cos\theta_c) + 4\frac{We}{\sqrt{Re}}}} \tag{I.8}$$

Chapitre I : Etude bibliographique

Dans ce modèle le transfert thermique s'effectue par conduction, que le substrat est isotherme et que la résistance thermique de contact est négligeable. Ils expriment s^* en fonction du nombre de Stefan ($St = \frac{cp(T_f - T)}{L_f}$ avec T_f et L_f la température et la chaleur latente de fusion), du nombre de Peclet ($Pe = \frac{V_0 D_0}{a_g}$ avec a_g la diffusivité thermique de la goutte) et du temps adimensionnel ($t^* = tV_0 D_0$), voir équation 1.9.

$$s^* = \sqrt{2t^* \frac{St}{Pe}} \quad 1.9$$

1.3.5 Différents types d'impact

Des études expérimentales ont montré que les lamelles sont présentes soient sous forme continue soient sous d'éclaboussures. Ce résultat est le bilan des actions de différents paramètres : l'énergie cinétique et la viscosité de la goutte, la topographie du substrat, la température du substrat, etc. Les observations de Mundo et al. [29], à la suite de leurs travaux concernant le dépôt des gouttes d'éthanol, d'eau et d'un mélange eau/saccharose/éthanol sur un substrat en acier inoxydable. Ils ont montré que l'état de cette goutte à l'impact dépendait du nombre de Sommerfeld K , lié aux paramètres cinétiques de la goutte en vol :

$$K = \sqrt{We^4 Re} \quad 1.10$$

Ainsi, l'impact est de type éclaté pour un nombre de Sommerfeld supérieur à 57,7. L'impact est de type dépôt pour $3 < K < 57,7$. Et la goutte rebondit pour $K < 3$. Fukumoto et al. [24] complètent le critère de Sommerfeld pour le cas où il n'y a pas d'éclaboussures à l'impact mais pendant l'étalement. Ils définissent le critère de la valeur critique K_f telle que :

$$K_f = 0.5 \cdot m^{1.25} \cdot Re^{0.3} \cdot K \quad 1.11$$

Où m est le rapport entre la vitesse maximale du front d'étalement V_f et la vitesse de la particule avant impact V_0 , tel que $m = V_f/V_0$. Ainsi, pour $K_f > 7$, la particule s'éclate pendant son étalement sur le substrat et, pour $K_f < 7$, il n'y a pas d'éclatement durant l'étalement.

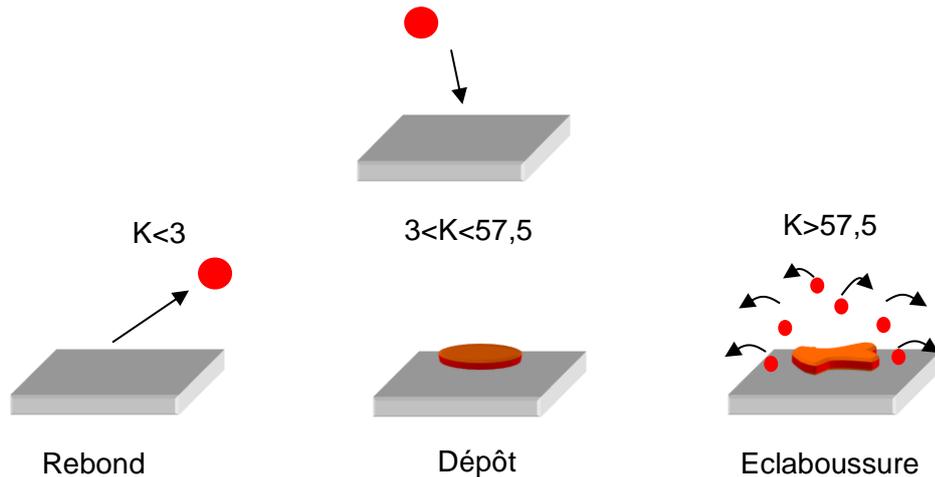


Figure I.15 : Les différents types d'impacts en fonction de la valeur du paramètre de Sommerfeld K

I.4 Echanges thermique à l'impact

Généralement, la gouttelette et le substrat sont initialement à des températures différentes. L'impact constitue un contact brusque qui est suivi d'échange thermique instantané. Il a été mis en évidence dans plusieurs études que le refroidissement et l'étalement de la gouttelette se produisent simultanément, plus au moins rapidement selon la diffusivité du substrat est forte ou non [2, 5, 22]. Pendant l'étalement de la gouttelette, la convection thermique dans la gouttelette est importante en raison des fortes vitesses tangentielles sur une faible épaisseur. Lors de l'étalement la chaleur est transférée au substrat, ce qui à la fois réchauffe ce dernier et refroidit le fluide en étalement, mais maintient la température de la gouttelette au point d'impact. C'est pour cette raison que la température de la gouttelette est au même instant plus importante au point d'impact et faible dans la zone d'étalement.

La chaleur provenant de la gouttelette se diffuse par conduction dans le substrat. La température est plus élevée sous la zone d'impact près de la surface. Les isothermes se développent alors d'avantage le long de la surface qu'en profondeur à cause de l'étalement de la gouttelette dans la direction radiale. Après l'étalement total de la gouttelette, le champ de la température dans la lamelle devient quasi monodimensionnel. Les flux thermiques s'orientent du centre de la gouttelette vers les bords, ainsi le centre est plus refroidi par transfert de chaleur du centre vers les bords que par échange thermique du centre de la gouttelette vers la profondeur du substrat. Cela démontre que l'hypothèse selon laquelle le transfert de chaleur

Chapitre I : Etude bibliographique

se produit une fois que l'étalement de la gouttelette est achevé n'est pas toujours valable. Cette hypothèse dépend de la diffusivité du substrat qui dans certains cas est trop élevée, pour que les deux phénomènes soient découplés [5, 22].

1.4.1 La solidification

Dans la nature, la solidification est un phénomène très répandu. La solidification est un réarrangement de la structure de la matière. Elle passe d'une structure stable désordonnée à l'état liquide à un réseau ordonné stable à l'état solide, cette transformation s'accompagne d'un dégagement de chaleur. L'énergie interne d'un corps à l'état liquide est plus élevée que celle de l'état solide. Cette différence d'énergie est appelée chaleur latente de fusion. L'énergie interne d'un corps est la somme de sa chaleur sensible ($Q = \rho c_p T$) et de sa chaleur latente de fusion L_f , cette dernière est libérée lors de la solidification.

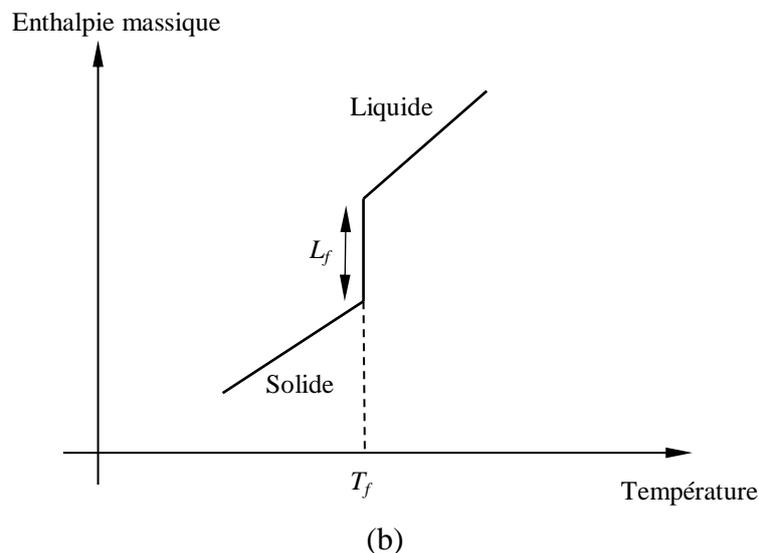
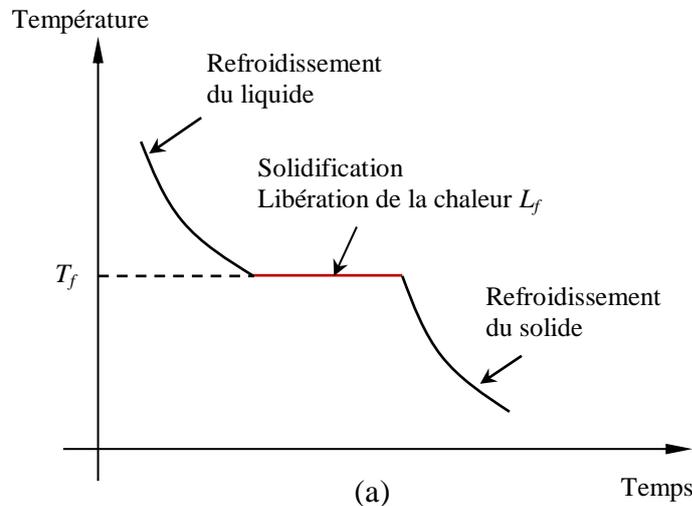


Figure 1.16 : Évolution au cours du temps de la température (a) et de l'enthalpie en fonction de la température (b).

La courbe du refroidissement (figure I.16a), présente un palier lorsque la température atteint le point de fusion T_f . La libération de la chaleur latente de fusion aura lieu à température constante pour un corps pur. La durée du changement d'état dépend principalement des échanges thermiques.

1.4.2 Résistance thermique de contact

La morphologie des lamelles dépend fortement de la résistance thermique de contact [30, 31] Lorsqu'une gouttelette fondue heurte un substrat plus froid, le transfert de chaleur de la gouttelette au substrat se produit. En conséquence, la gouttelette se refroidit et se solidifie avec le temps. L'air sera piégé dans des crevasses à l'interface liquide/solide (figure 1.17). Au fil du temps, l'interface passe d'un contact liquide/solide initial à un contact solide/solide. La transformation fait varier la résistance thermique de contact qui explique la discontinuité à l'interface entre la lamelle et le substrat. Beaucoup de travaux ont été faite pour comprendre et quantifier cette valeur de résistance de contact. En utilisant un temps de réponse relativement faible de 1,5 ms (pyromètre IR à une ou deux couleurs), la température de surface de la lamelle de taille millimétrique peut être mesurée. La résistance thermique de contact peut être estimée en résolvant le problème de transfert de chaleur inverse [32, 33]. La résistance de contact thermique a été trouvée dans la plage de 10^{-3} à $10^{-6} m^2KW^{-1}$. Loulou et al. [34] ont utilisé des thermocouples avec un temps de réponse inférieur à 0,1 ms pour mesurer les températures du substrat et des gouttelettes et ont estimé une résistance thermique de contact de $10^{-4} m^2KW^{-1}$. Cependant, en raison de la solidification rapide de la lamelle de l'ordre des microsecondes qui était significativement plus petit que le temps de réponse de thermocouples, les mesures de la température des gouttelettes n'étaient valables qu'après solidification de la lamelle. Récemment, des pyromètres bicolores à grande vitesse ont été utilisés pour obtenir une variation de la température de projection pendant l'impact des particules pulvérisées au plasma. La très faible réponse en temps inférieur à 1 micro seconde de ces pyromètres assure l'enregistrement de la température avant le début de la solidification.

Il a été constaté que la résistance thermique de contact est une fonction complexe des paramètres variés: les conditions de surface du substrat, les conditions de projection et le

Chapitre I : Etude bibliographique

contact à l'interface substrat/lamelle. De plus, la résistance thermique de contact varie avec le temps et la position à travers l'interface. Ainsi, la mesure de la valeur réelle de la résistance thermique de contact à chaque point de contact pour une gouttelette micrométrique est impossible. Alternativement, la résistance thermique de contact peut être estimée sur la base de la zone de contact entre la lamelle et le substrat [35], en utilisant un modèle de conduction analytique unidimensionnel [35]. La fonction sous-jacente de ce modèle a été construite en ajustant au mieux les valeurs numériques aux données expérimentales. Pour réduire la complexité, une valeur constante de la résistance thermique de contact est couramment utilisée dans la modélisation numérique du processus d'étalement et de solidification des gouttelettes. McDonald et al. [36] et Dhiman et al. [37] ont observé que des lamelles de disques ronds étaient obtenues lors de la projection plasma de particules de nickel ou de molybdène sur un substrat en acier inoxydable ou en Inconel. Dans ces cas, la résistance thermique de contact a été calculée et rapportée dans un ordre de grandeur de $10^{-6} m^2KW^{-1}$. Dans d'autres travaux, la résistance thermique de contact a été estimée dans la plage de 10^{-8} à $10^{-5} m^2KW^{-1}$ pour un contact bon à mauvais, respectivement, entre le splat et le substrat [5, 38].

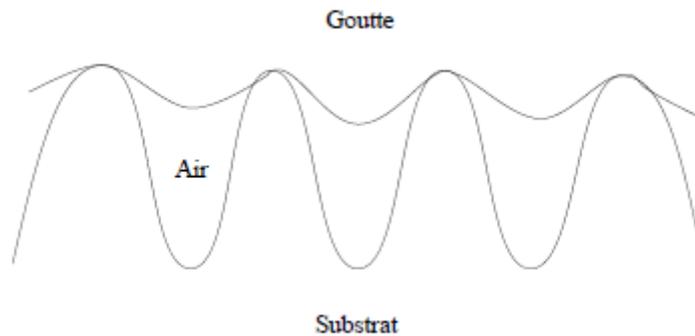


Figure 1.17 : Illustration du contact d'une gouttelette et d'un substrat.

I.5 Fusion du substrat

Lors de l'impact d'une gouttelette fondue sur un substrat, une fusion locale du substrat peut se produire. La liaison entre le dépôt et le substrat peut être améliorée avec la fusion du substrat. Néanmoins, la fusion du substrat peut endommager le substrat et altérer ses propriétés chimiques. Par conséquent, la fusion du substrat a été étudiée de manière approfondie. Kitahara et al. [39] ont signalé que le substrat fondait lorsque le nickel, le chrome, le molybdène et le tungstène étaient projetés au plasma sur des substrats en

Chapitre I : Etude bibliographique

aluminium et en acier doux. Une couche de composés intermétalliques a été identifiée par diffraction des rayons X à l'interface dans plusieurs combinaisons substrat-particules [39]. Steffens et al. [40] ont indiqué que la fusion du substrat dépendait fortement des propriétés thermo physiques des gouttelettes, de la température de contact et du temps de solidification. Le degré de fusion augmente avec la température élevée du substrat ou de la gouttelette, temps d'interaction long ou faible conductivité thermique des substrats [40]. Lors de la projection des particules de molybdène au plasma sur un substrat en acier doux, Zhang et al. [41] ont également détecté une couche intermétallique de Fe₂Mo en utilisant le TEM (Transmission electron microscopy) à l'interface entre les particules de molybdène et le substrat en acier doux et ont suggéré que la fusion du substrat avait eu lieu.

Li et al. [42] ont étudié la fusion de substrats pour différentes particules et combinaisons de matériaux de substrat. Ils ont suggéré que la fusion du substrat pourrait se produire lorsque des gouttelettes à température de fusion élevée, généralement de la céramique, heurtaient des substrats à bas point de fusion. Li et al. [43] ont récemment montré que le substrat fondait et interagissait avec les gouttelettes qui s'étaient étalées lorsque le molybdène était projeté sur l'acier inoxydable, le laiton et l'aluminium. Dans leurs résultats, une profondeur de fusion de 0,5 µm et 3,5 µm a été observée pour les substrats en acier inoxydable et en aluminium respectivement. En outre, il a été signalé que la fusion du substrat peut être contrôlée par la distance de projection, la température de la flamme, le contact lamelle/substrat et la température initiale du substrat [44]. Tous ces résultats expérimentaux ont confirmé qu'une meilleure liaison pouvait être obtenue grâce à la formation de composés intermétalliques résultant de la fusion du substrat lors de l'interaction gouttelette/substrat. La force d'adhérence est significativement plus faible en l'absence de fusion du substrat [39-41, 43-45].

La température d'interface au point de contact entre le substrat et la lamelle peut être obtenue numériquement à partir des propriétés du substrat et de la lamelle. En supposant que le substrat et la lamelle sont deux corps semi-infinis initialement à la température de T_1 et T_2 (° C) respectivement et que le contact entre eux est parfait, la température à la surface de contact T_i est donnée par leurs effusivités thermiques relatives [46]:

$$T_i = T_1 + (T_2 - T_1) \left(\frac{e_2}{e_1 + e_2} \right) \quad I. 12$$

Où :

$$e_{1,2} = \sqrt{(k\rho C_p)_{1,2}} \quad I.13$$

e_1 , e_2 sont les effusivités thermiques du substrat et de la lamelle respectivement. L'effusivité thermique est une mesure de sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement, où k ($Wm^{-1}K^{-1}$) est la conductivité thermique, ρ ($kg.m^{-3}$) est la masse volumique, C_p ($J.kg^{-1}K^{-1}$) est la chaleur spécifique. Si la température à l'interface calculée à partir des équations ci-dessus est supérieure à la température de fusion du substrat, la fusion du substrat se produira. Ainsi, la température d'interface peut être utilisée pour prédire la possibilité de la fusion du substrat.

I.5.1 Éclaboussures induites par la fusion du substrat

Le traitement thermique du substrat a été considéré comme un moyen efficace de supprimer les éclaboussures [5, 22, 23, 47, 48]. Cependant, lors du dépôt de particules de molybdène sur l'acier inoxydable, Li et al. [43] ont observé que des éclaboussures se sont produites et ne peuvent pas être supprimées par préchauffage du substrat. Des éclaboussures à morphologie de rupture remarquable, qualifiées de fleur, ont été observées (Figure I. 18). De plus, la projection plasma de particules de molybdène sur l'acier a provoqué la fusion du substrat [42, 43, 49, 50]. La fusion localisée de la surface du substrat a provoqué des éclaboussures appelées éclaboussures induites par la fusion [43].

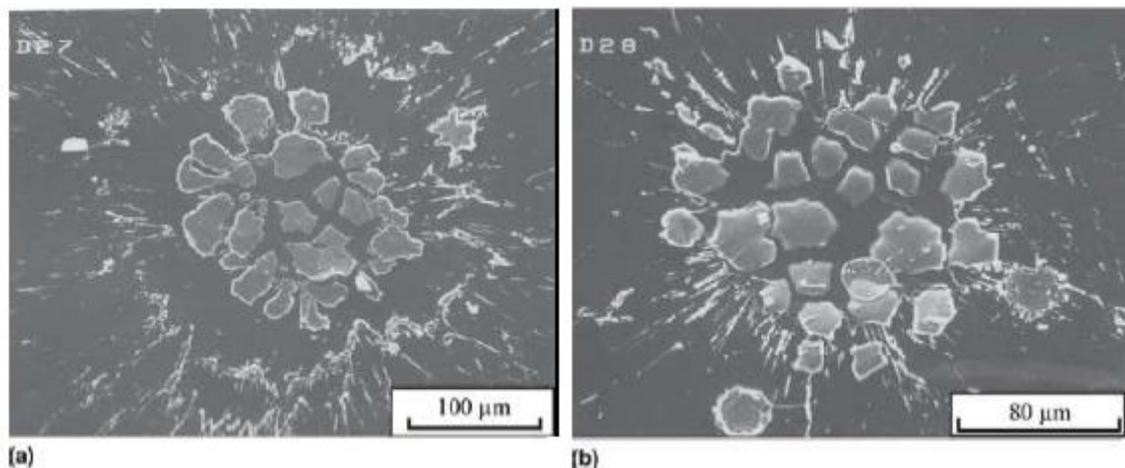


Figure I.18 : Morphologie des éclaboussures de molybdène déposées sur l'acier inoxydable, substrats préchauffés à une température de (a) 200°C et (b) 400°C [43].

Il a été suggéré que lorsqu'une gouttelette est déposée sur un substrat avec un point de fusion beaucoup plus bas, le substrat est fondu par la chaleur transférée de la gouttelette. En raison d'une pression dynamique élevée, le substrat fondu a été poussé pour s'écouler le long de la lamelle solidifiée, entraînant la formation d'un cratère autour du point d'impact (Figure I.19). Ce cratère a modifié l'écoulement de la gouttelette, entraînant le détachement et le jet de la gouttelette sous forme d'éclaboussures. Le degré d'éclaboussement dépendait de la taille du cratère fondu. Le traitement thermique du substrat augmente la fusion du substrat, formant un plus grand cratère, qui a favorisé plutôt que supprimé les éclaboussures. Cependant, si la fusion du substrat n'est pas suffisamment profonde pour détacher la gouttelette liquide de la surface du substrat, les éclaboussures étaient dominées par les autres mécanismes.

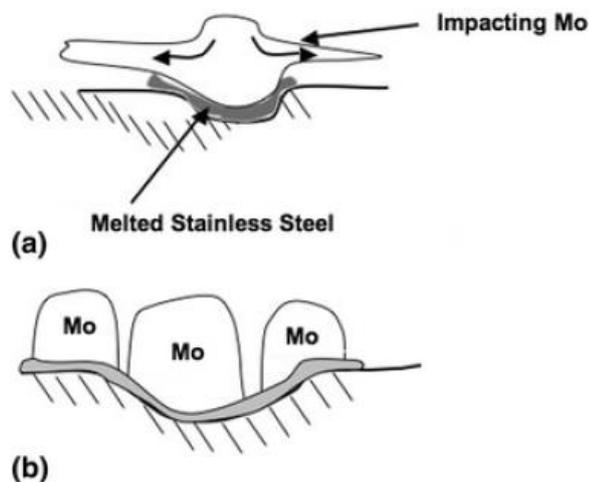


Figure I.19 : (a) schéma d'une particule de Mo impactant sur un substrat en acier inoxydable avec l'acier inoxydable fondu dans le cratère formé en dessous. (b) Morceaux de Mo détachés de la partie centrale de la gouttelette flottant sur de l'acier inoxydable fondu [43].

I.6 Effet des conditions de surface du substrat

I.6.1 Température de transition

De nombreuses recherches ont démontré que la morphologie et le comportement du dépôt réalisé par projection plasma étaient fortement affectés par la température du substrat [3, 5, 22, 23, 48, 51-53]. Ces travaux ont montré que les substrats chauffés au-dessus d'une valeur donnée de température, définie comme la température de transition par Fukumoto [53],

Chapitre I : Etude bibliographique

sont favorables à la formation des lamelles en forme de disque. En revanche, les lamelles sur des substrats maintenus en dessous de la température de transition étaient de forme principalement irrégulière ou éclaboussée [51]. Il a également été signalé que l'adhérence des revêtements sur le substrat préchauffé au-dessus de la température de transition était deux à cinq fois meilleure que celle des substrats préchauffés au-dessous de la température de transition [53-54]. Cette dépendance entre la force d'adhérence du revêtement et la température du substrat a la même la tendance présentée dans la figure I.20. Il y a une bonne corrélation entre la morphologie des lamelles et la force d'adhérence. Cependant, la cause sous-jacente du changement de la morphologie des lamelles avec la température du substrat n'est pas clairement comprise. Elle a été attribuée à des changements dans l'état chimique de la surface du substrat [48, 51, 55, 56] ou à des changements de rugosité de surface [3, 22, 55, 52].

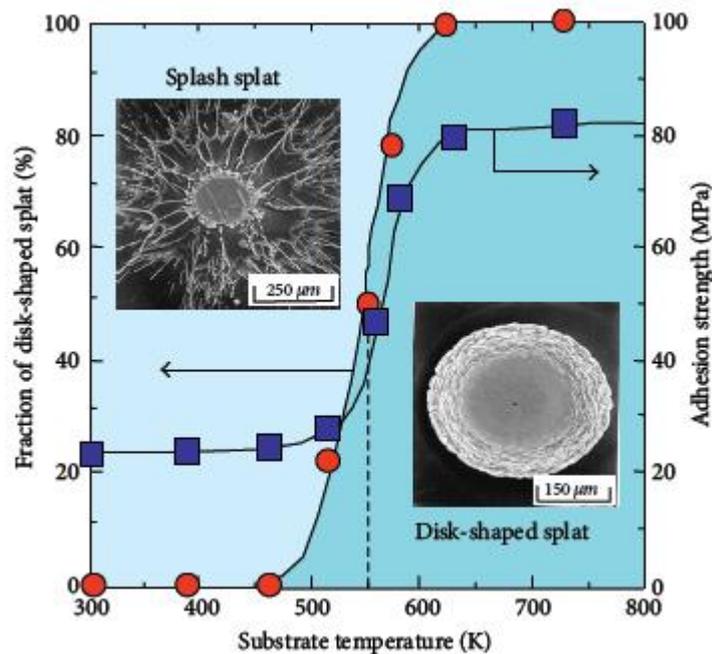


Figure I.20 : Effet de la température du substrat sur la morphologie et la force l'adhérence de la lamelle des particules de Ni sur un substrat en acier inoxydable AISI304 [52].

I.6.2 La rugosité de la surface du substrat

Il a été constaté que dans la plupart des cas, une augmentation de la rugosité de surface des substrats améliore l'adhérence par liaison mécanique [5, 22]. En projection plasma, le

Chapitre I : Etude bibliographique

substrat subit une opération de sablage destinée à produire une certaine rugosité de surface, adaptée à la taille des particules projetées [57]. Ceci est essentiel pour que les lamelles s'accrochent aux aspérités lors de leur solidification, selon un mécanisme illustré par la figure I.21. Le traitement thermique du substrat avant la projection peut augmenter la rugosité moyenne R_a de la surface à l'échelle nanométrique, ce qui peut également affecter le processus de formation des lamelles [54, 58]. L'analyse par microscopie à force atomique (MFA) [54] de la surface d'un substrat en acier inoxydable 304L, à une température ambiante (figure 1.22a) et préchauffé à 673 K (figure 1.22b), montre clairement une modification de la surface par développement d'une certaine rugosité à l'échelle nanométrique.

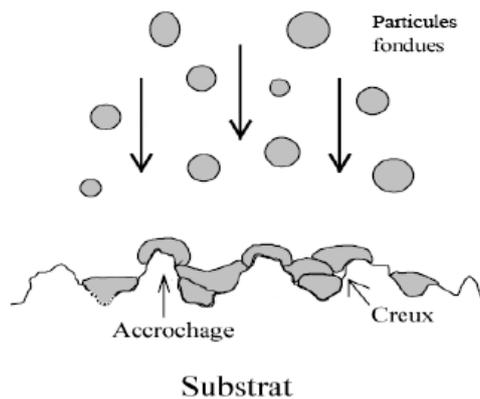


Figure I.21 : Accrochage mécanique des gouttelettes sur les aspérités de la surface du substrat.

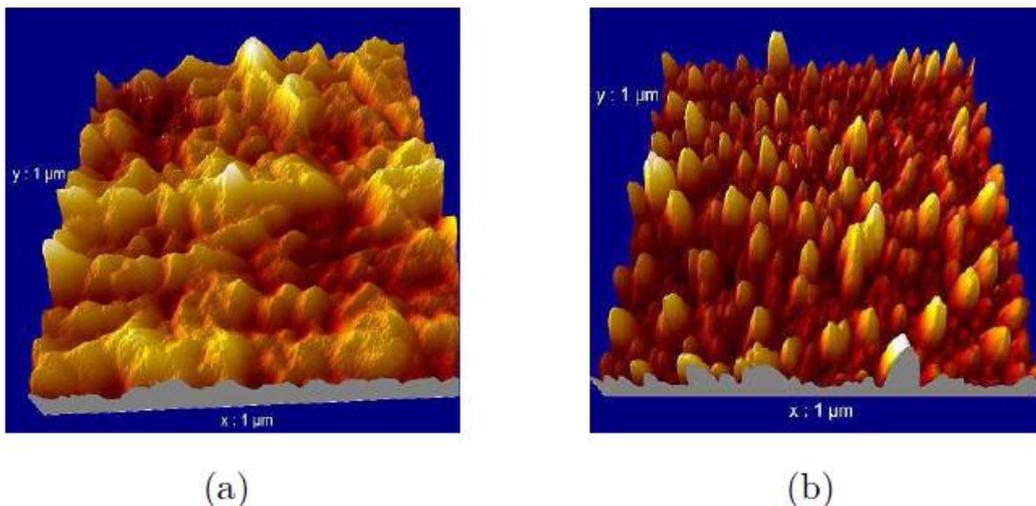


Figure I.22 : Image obtenue par microscopie à force atomique d'un substrat d'acier inoxydable (a) à température ambiante (300 K), (b) préchauffé à 673 K [54].

Chapitre I : Etude bibliographique

A cause de cette modification de la rugosité à l'échelle nanométrique, Fukumoto et al [58] ont introduit d'autres paramètres que la R_a pour caractériser la topographie de la surface. Ils ont ainsi défini le paramètre d'asymétrie S_k , qui représente le nombre de pics par rapport à celui des creux (figura 1.23). Pour une surface ayant subi un préchauffage, présente un S_k proche de l'unité, cette surface présente plus de pics que de creux par rapport à une surface non préchauffée dont S_k est proche de zéro. Pour un S_k positif la lamelle à une forme de disque et pour un S_k nul ou négatif la lamelle tend vers une forme éclatée.

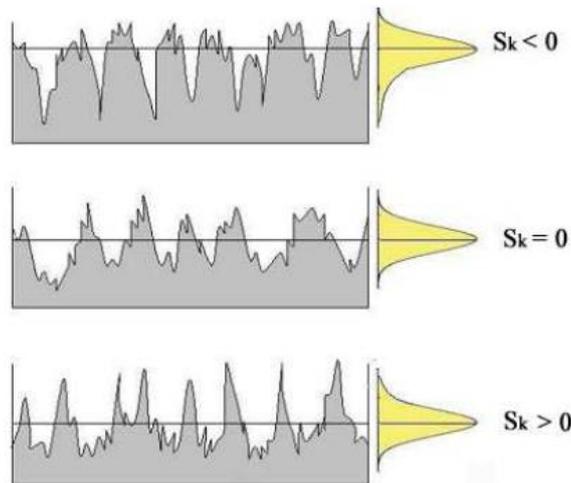


Figure I.23 : Définition du paramètre d'oblicité S_k pour différentes topographies de surface [54].

I.6.3 Etat de la surface du substrat

La morphologie des lamelles est influencée par la présence d'adsorbats/condensats à la surface du substrat, bien que cette influence n'ait reçu qu'une attention limitée dans le revêtement par projection thermique. Pour étudier l'effet des adsorbats sur la morphologie des lamelles, un substrat en acier inoxydable poli a été recouvert par une fine couche de composés organiques (xylène, glycol et glycérol). Le substrat a ensuite été préchauffé et projeté au plasma avec des particules d'aluminium, de nickel, d'alumine ou de cuivre. Li et al. [59] ont signalé que des lamelles en forme de disque ont été observées lorsque le substrat a été préchauffé à 323 K au-dessus du point d'ébullition des composés organiques. En revanche, des lamelles fragmentées ont été trouvées lorsque le substrat a été préchauffé en dessous du point d'ébullition des composés organiques. Par conséquent, Li et al. [59] ont conclu que l'évaporation de la couche organique lors de l'impact des gouttelettes fondues avec la surface du substrat induisait l'éclaboussure des lamelles. Lors de l'impact, la chaleur est rapidement transférée au substrat, cette chaleur provoque la désorption des adsorbats et des condensats

Chapitre I : Etude bibliographique

sur la surface du substrat qui réduit le contact entre la gouttelette et le substrat. Tandis que la gouttelette s'étale au maximum et commence à se déchiqueter, les adsorbats vaporisés éclatent à travers la couche liquide, provoquant l'éclatement de la lamelle [43]. Le traitement thermique du substrat avant la projection peut éliminer les adsorbats/condensats. En conséquence, le contact entre la gouttelette et le substrat améliore et favorise la formation de lamelles en forme de disque [51]. Cependant, la plupart des substrats sont peu susceptibles d'être contaminés par du xylène, du glycol ou du glycérol. Ainsi, la question est de savoir quels sont les "Adsorbats/condensats" sur un substrat typique ? Et à quelle température se produit la désorption des adsorbats / condensés?

I.7 Effet des paramètres de projection sur la formation des lamelles

La formation et la morphologie des lamelles sont également profondément affectées par les conditions de projection, en particulier la température et la vitesse des particules [3, 5]. Si la température des particules n'est pas suffisamment élevée, des particules non fondues peuvent être incorporées dans les revêtements. Ces régions auront des vides, une mauvaise adhérence et finiront par entraîner une défaillance des revêtements. En revanche, une température élevée augmente l'oxydation des particules, entraînant l'inclusion d'oxydes dans les revêtements [2]. Si la température est inférieure au point de fusion des particules, l'oxydation est contrôlée par diffusion et se produit à la périphérie des particules. A une température plus élevée, l'oxydation se produit par convection à l'intérieur de la gouttelette liquide, entraînant des niveaux beaucoup plus élevés de concentrations d'oxyde [5]. Outre la température, l'oxydation dépend également de la vitesse des particules et de la nature du milieu environnant. Une faible vitesse ou des temps de séjour plus longs augmentent la concentration de l'oxyde dans les revêtements [5]. La projection en atmosphère inerte réduit intuitivement la formation d'oxyde. L'inclusion d'oxyde affecte la microstructure, les propriétés et les performances des revêtements. Des teneurs élevées en oxyde conduisent à la rupture des revêtements, car l'oxyde se fracture facilement. Les oxydes le long des limites des couches affectent négativement la cohésion entre les couches, réduisant la résistance des revêtements. Cependant, l'oxydation est souhaitable dans certaines applications pour améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure ou la dureté [2, 60].

La température élevée des particules métalliques contribue également au phénomène d'éclaboussure des lamelles. En raison de la température élevée, les lamelles sont à l'état

Chapitre I : Etude bibliographique

liquide plus longtemps. L'instabilité le long de l'interface lamelle/substrat ou l'évaporation des condensats/adsorbats sur la surface du substrat lors de l'impact peut provoquer des éclaboussures des lamelles [5, 56]. Les éclaboussures sont également augmentées avec une vitesse plus élevée des particules. En conséquence, la lamelle obtenue avec une vitesse de gouttelette plus élevée est plus mince que ceux obtenus avec une vitesse plus faible. La lamelle est solidifiée, initialement à partir de des périphéries, et le front de solidification avance vers le centre de la lamelle. Si la vitesse du liquide d'étalement est élevée en raison de la vitesse élevée des particules, le matériau fondu peut projeter sur le dessus de la couche solidifiée, devenir instable et se briser. Ainsi, la rupture dans ce cas est due à la différence de vitesse de solidification au sein de la lamelle. Dans le cas d'une vitesse d'impact plus faible, le flux de fluide n'aura pas assez d'énergie cinétique pour être projeté. En conséquence, la rupture de la lamelle sera éliminée en cas de faible vitesse des particules [22].

I.8 Modélisation numérique de la formation des lamelles

I.8.1 Modélisation de l'impact, l'étalement et de la solidification des gouttelettes

La qualité du revêtement réalisé par projection thermique, dépend d'un grand nombre de variables telles que les conditions d'impact des particules, les propriétés des particules, la température du substrat, les propriétés du substrat, etc. Pour améliorer cette qualité, il est nécessaire d'examiner l'influence de ces paramètres sur la morphologie des lamelles. Cependant, les phénomènes physiques tels que la déformation des gouttelettes et leur étalement se produisent simultanément à l'échelle d'une microseconde. Il est très difficile d'observer directement le processus d'étalement et de solidification à cette échelle de temps. Par conséquent, parallèlement à des études expérimentales, la modélisation numérique a été largement utilisée pour comprendre et prédire les effets de chaque paramètre sur la morphologie finale des lamelles.

Il est bien connu quand une gouttelette fondue impacte un substrat plus froid, elle s'étale et se solidifie pour former une lamelle. Ainsi, des simulations numériques d'impact impliquent un modèle de surface libre avec une interface liquide/solide mobile et un modèle de transfert de chaleur entre la gouttelette et le substrat. En raison de la très grande vitesse de la gouttelette à l'impact, un modèle compressible est utilisé au début de l'impact. La pression

Chapitre I : Etude bibliographique

lors de l'impact des gouttelettes peut être obtenue à partir de ce modèle compressible. Cependant, aucun résultat sur le diamètre de la lamelle final n'a été rapporté en utilisant ce modèle. Juste après l'impact, la vitesse des gouttelettes diminue, à ce stade un modèle incompressible peut être utilisé. En raison de la complexité du modèle compressible [61, 62], la plupart des modèles numériques appliquent un flux incompressible simplifié [63-68].

Le premier modèle numérique d'une gouttelette liquide s'étalant sur une surface plane a été développé en 1967 par Harlow et al [69]. Dans ce modèle, les équations complètes de Navier-Stokes ont été résolues en coordonnées cylindriques en utilisant la méthode des différences finies «Marker-and-Cell» (MAC), avec l'hypothèse que les gouttelettes sont symétriques par rapport à leur axe vertical [70]. Cependant, les effets de la tension superficielle et de la viscosité ont été négligés pour simplifier le modèle. Par conséquent, leurs résultats étaient principalement applicables au stade précoce de l'impact des gouttelettes lorsque l'énergie cinétique est dominante. Le phénomène d'éclaboussures et le diamètre final des éclaboussures n'ont pas été obtenus dans cette étude. Néanmoins, ce travail de pionnier a fourni un début précieux pour la modélisation de l'impact impliquant une surface libre. En 1971, Jones a proposé un modèle simplifié de l'impact isotherme des gouttelettes liquides sans tension de surface et sans effets de solidification [71]. Cependant, l'épaisseur d'éclaboussure du modèle était trop petite par rapport à la valeur observée. En 1976, Madejski [27] a développé un modèle simple utilisant une approche de Stefan unidimensionnelle pour examiner le processus de solidification et un écoulement radial bidimensionnel d'une gouttelette sphérique. Les effets visqueux, inertiels et de tension de surface ont également été pris en compte dans le modèle pour déterminer le degré d'aplatissement et l'étalement des gouttelettes. Dans son étude, Madejski a également conclu que le mécanisme de solidification était le facteur dominant pour déterminer la taille de la lamelle. Les études de Madejski ont constitué la base pour explorer les mécanismes qui régissent le processus de l'étalement et de solidification des lamelles. Depuis lors, un certain nombre d'autres chercheurs ont développé des modèles pour étudier le dépôt de gouttelettes et les ont comparés au modèle de Madejski. Fiedler et al [72] a proposé une analyse assez similaire au modèle de Madejski. Bien que la solidification n'ait pas été prise en compte dans leur modèle, les résultats des deux groupes étaient presque identiques. Plus tard, Tsurutani et al. [73] et Trapaga et al. [62] ont amélioré le modèle MAC de Harlow et al. [69] en utilisant en outre la méthode du «volume de fluide» pour prendre en compte les effets de la tension superficielle, de la viscosité et du transfert de chaleur entre la gouttelette et le substrat. La méthode du volume de fluide est une technique

Chapitre I : Etude bibliographique

numérique qui permet de suivre et de localiser l'interface fluide/fluide. En plus de quelques résultats similaires à ceux du modèle de Madejski [27], ces résultats ont montré le phénomène de rupture des lamelles en tant que liquide non mouillant. Dans le cas du liquide mouillant, la tension superficielle n'a pas contribué au diamètre final de la lamelle [62]. Liu et al [74] ont simulé l'étalement et la solidification de gouttelettes fondues en utilisant la méthode du «volume de fluide» basée sur le code RIPPLE [75] pour examiner l'impact sur une surface ondulée. Le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide de l'impact des gouttelettes ont été étudiés expérimentalement et numériquement par Zhao et al [76]. Cependant, dans ce modèle, la solidification pendant l'étalement n'a pas été prise en compte. Dans l'ensemble, dans tous ces modèles numériques bidimensionnels, l'effet de la résistance de contact thermique à l'interface gouttelette/substrat n'a pas été pris en compte. De plus, l'angle de contact liquide/solide était supposé constant à 90 degrés [62, 72-74, 76-78]. Bien que des résultats importants sur le processus de l'étalement et de solidification des gouttelettes puissent être obtenus à partir du modèle bidimensionnel, un modèle entièrement tridimensionnel est nécessaire pour modéliser des écoulements plus complexes tels que l'impact sur les surfaces inclinées du substrat ou pour examiner les phénomènes d'éclaboussures et de décomposition. Ces phénomènes sont fréquemment rencontrés dans le revêtement par projection thermique.

Ces dernières années, des modèles entièrement tridimensionnels ont été largement utilisés pour examiner la formation et la morphologie des éclaboussures. Bussmann et al [64, 65] ont développé un modèle tridimensionnel utilisant une méthode de suivi du volume pour simuler des gouttelettes d'eau tombant à faible vitesse (~ 1 m/s) sur un plan incliné et étudier l'éclaboussure d'une gouttelette sur une surface solide. Leurs résultats numériques correspondaient assez bien aux photographies de l'impact des gouttelettes. Dans ce modèle, les conditions aux limites de la ligne de contact solide/liquide ont été spécifiées pour examiner leurs effets sur l'impact des gouttelettes lorsque la force de tension superficielle est le facteur dominant dans l'écoulement du fluide. La limitation de ce modèle est que le transfert de chaleur et le changement de phase lors de l'impact des gouttelettes n'ont pas été pris en compte. Pasandideh et al [31] ont étendu le modèle de Bussmann et al [64, 65] pour inclure le transfert de chaleur et la solidification dans la simulation de l'impact des gouttelettes sur une surface plane. Cependant, leurs résultats numériques concernant la morphologie des lamelles ne concordaient pas bien avec les observations expérimentales. Zheng et al [79] ont développé une approche tridimensionnelle utilisant la méthode «level

Chapitre I : Etude bibliographique

set » pour capturer la déformation de la surface libre avec et sans solidification. Cependant, leurs résultats numériques n'ont pas été validés par des résultats expérimentaux.

A. Abdellah et al [80] ont utilisé la méthode des éléments finis couplée avec la méthode de volume de fluide (VOF) pour étudier le processus de dépôt, ils ont modélisé la solidification de la gouttelette par la méthode de la chaleur spécifique (SHM). D'après les résultats des simulations, ils ont constaté que la variation de la température du gaz environnant a un impact important sur la morphologie des lamelles et peut affecter l'adhérence entre la lamelle et le substrat. Tabbara et al [81] ont développé un modèle numérique basé sur la méthode CFD. Ils ont simulé l'impact d'une gouttelette millimétrique sur un substrat solide, pour différentes vitesses d'impacts. Leurs résultats ont mis en lumière les phénomènes de rupture lors de l'impact et décrit comment le processus de solidification varie avec une vitesse d'impact croissante. Oukache et al [82] ont modélisé l'étalement et la solidification d'une gouttelette d'alumine complètement fondue sur un substrat en utilisant la méthode des éléments finis. L'interface entre la gouttelette et l'air est suivie par la méthode Level Set. A l'aide de ce modèle, ils ont obtenu une nouvelle corrélation qui prédit le degré d'étalement final de la lamelle en fonction du nombre de Reynolds. Zhang et al [83, 84] ont utilisé un modèle numérique dans un domaine 2D, basé sur la méthode CFD, pour étudier l'influence températures initiales des gouttelettes, vitesse d'impact, du transfert de chaleur interfacial, de la tension superficielle et de l'angle de contact sur le comportement de l'étalement des gouttelettes dans la formation des revêtements réalisés par projection plasma. Ils ont trouvé que le transfert de chaleur interfacial influe d'une manière importante sur la morphologie finale de la lamelle, et qu'une faible tension superficielle favorise les projections de liquide, tandis que l'angle de contact influe moins sur la morphologie de la lamelle. Rajesh et al [85] ont analysé numériquement la formation des pores en examinant la dynamique du film d'air piégé lors de l'impact à grande vitesse d'une gouttelette micrométrique métallique fondu sur un substrat. Leur modèle est basé sur la CFD, La méthode (VOF) est couplée au modèle de solidification et de transfert de chaleur. Les résultats montrent qu'initialement un mince film circulaire d'air est piégé dans la gouttelette percutante qui s'est ensuite transformée en une bulle. Leur analyse du transfert de chaleur montre que la distribution du flux thermique à la surface du substrat a une forte relation avec la caractéristique dynamique de l'air emprisonné.

I.8.2 Simulation numérique impliquant la fusion de substrats

Des simulations numériques ont également été utilisées pour prédire les phénomènes de fusion du substrat sous l'impact d'une gouttelette fondue. Wang et al [86] et Li et al [42] ont étudié la solidification de la lamelle et la fusion de substrats à l'aide d'un modèle de conduction unidimensionnelle. La fusion du substrat pourrait se produire si une gouttelette à température de fusion élevée impactait un substrat à basse température de fusion. Li et al. [42] ont proposé un «facteur de température» qui pourrait être utilisé pour prédire la fusion du substrat. Sur la base de ce facteur, la fusion du substrat ne devrait pas se produire pour le nickel et le chrome sur un substrat en acier doux [42]. Wang et al ont étudié la fusion de substrats et sa resolidification en utilisant la théorie de la solidification rapide [86]. Cependant, ces simulations numériques ont négligé l'énergie cinétique de la gouttelette et la déformation de la surface libre [42, 86]. Plus tard, Zhang et al [41, 50] ont étendu le modèle pour combiner un modèle de déformation de surface libre bidimensionnel avec un modèle de solidification rapide unidimensionnel hors équilibre. Bien que le modèle combiné puisse prédire le taux de solidification et la morphologie des lamelles, la variation des températures à l'intérieur de la gouttelette et le long de l'interface lamelle/substrat n'a pas pu être obtenue. Des modèles numériques tridimensionnels ont également été utilisés pour étudier le processus d'étalement des gouttelettes et la forme des lamelles [31, 44, 65]. Cependant, tous ces modèles se sont limités à l'étude de la fusion du substrat lors de l'étalement et la solidification de la lamelle, en particulier la distribution de température à la surface du substrat en fonction du temps et des emplacements.

Amon et al [87] ont développé un modèle numérique pour résoudre le problème de la conduction thermique unidimensionnelle, permettant de prédire la probabilité de la fusion du substrat, ainsi que la profondeur maximale de fusion dans le procédé de micro-coulée (micro casting). Wang et al [88] ont étudié numériquement le refroidissement et la solidification de la lamelle et du substrat, et ont déduit la profondeur maximale de fusion du substrat pour divers paramètres de processus. Zarzalejo et al [89] ont développé un modèle numérique pour étudier l'impact d'une gouttelette métallique sur un substrat solide, l'effet de la convection induit par l'étalement de la gouttelette est modélisé par une conductivité thermique efficace, le modèle prévoit la position du front de fusion et la resolidification dans le substrat. Attinger et al [90] ont numériquement étudié la fusion et la resolidification du substrat, lors de l'impact

Chapitre I : Etude bibliographique

d'une gouttelette fondue sur une surface solide de même matière. Le modèle est basé sur une formulation lagrangienne axisymétrique en élément fini. Zhang et al [91] ont étudié expérimentalement et numériquement la morphologie du spalt et la fusion du substrat, suite à l'impact d'une gouttelette fondue de molybdène sur un substrat en molybdène, acier doux et en verre. L'effet de la nature du substrat et de la température sur la morphologie du splat a été étudié. Li et al [42] ont développé un modèle numérique pour examiner l'effet de la solidification de gouttelette, et la fusion et la resolidification du substrat en projection thermique. Des études expérimentales et numériques ont été effectuées pour différentes combinaisons de gouttelettes et substrats. Il a été montré expérimentalement que les propriétés de la gouttelette et de substrat ont un effet important sur la fusion du substrat. Tran et al [92] ont développé un modèle tridimensionnel en utilisant le logiciel Ansys CFX, pour étudier la morphologie du splat et la fusion du substrat, lors de l'impact d'une gouttelette de Nickel fondue sur un substrat en acier inoxydable. Le modèle a été validé par des observations expérimentales réalisées par microscope à haute résolution. M. Zhang et al [93] ont utilisé pour la première fois la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) pour simuler l'interaction entre la gouttelette et le substrat. Ils ont déduit que la température initiale et les propriétés thermodynamique de la gouttelette et du substrat ont un effet important sur la fusion du substrat et la morphologie du splat. Rajesh. K. S. et al [94] ont étudié numériquement l'impact, l'étalement et la solidification d'une gouttelette fondue sur un substrat de matériaux différents en prenant en considération la fusion et la resolidification du substrat. Ils ont observé que la fusion du substrat pour le cas étudié commence peu après l'impact de la gouttelette. Ramanuj et al [95] ont étudié numériquement le changement de phase non isotherme lors du dépôt d'une gouttelette millimétrique en acier inoxydable (SS304) sur un substrat de même matériau, en considérant la fusion et la resolidification du substrat. Ils ont utilisé un schéma en volume finis pour résoudre les équations de la dynamique de fluide et de l'énergie. Ils ont étudié l'effet du préchauffage du substrat et la vitesse d'impact de la gouttelette sur la fusion du substrat, leurs résultats obtenus sont en bon accord avec des résultats expérimentaux publiés. Driouche et al [96] ont étudié numériquement la fusion du substrat lors de l'impact d'une gouttelette micrométrique en céramique sur un substrat métallique, dans les conditions de projection plasma, avec la méthode CFD. Le modèle est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie en incluant le changement de phase, en utilisant la méthode des volumes finis dans un domaine 2D-axisymétrique. La méthode VOF est utilisée pour suivre la surface libre de la gouttelette. Le contact imparfait entre la gouttelette et le substrat est

Chapitre I : Etude bibliographique

modélisé par une résistance thermique de contact. L'effet de la taille de la gouttelette sur son étalement et la fusion du substrat a été étudié. Ils ont montré que le volume fondu du substrat, ainsi que la profondeur de fusion sont presque linéairement proportionnels avec la taille initiale de la gouttelette. D'après leurs constatations la taille de la gouttelette a une importance dans la formation des revêtements réalisés par projection plasma, que ce soit sur la morphologie de la lamelle ou son adhérence avec le substrat.

Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de présenter les différents procédés de projections thermiques. Pour le cas du dépôt des céramiques sur des substrats métalliques, le cas de notre étude, la technique de projection plasma, présente un bon compromis température des particules/vitesse des particules, plus précisément pour les particules céramiques possédant un point de fusion élevé. Les vitesses acquises par les particules qui sont fondues en grande majorité permettent un bon étalement des gouttelettes sur le substrat et une bonne adhérence de dépôt. La qualité du revêtement réalisé par projection plasma, dépend d'un grand nombre de variables. Pour améliorer cette qualité, il est nécessaire d'examiner l'influence de ces paramètres sur la morphologie des lamelles. Cependant, l'étalement et la solidification se produisent simultanément à l'échelle de quelques microsecondes. Par conséquent, parallèlement à des études expérimentales, la modélisation numérique est le moyen le plus utilisée pour comprendre et prédire les effets de chaque paramètre sur la morphologie finale des lamelles. Dans cette thèse, nous allons développer un modèle pour prédire l'étalement et la solidification d'une gouttelette en céramique impactant un substrat métallique en fonction de quelques paramètres de projections et de substrat.

Introduction

Comprendre la formation de l'architecture du dépôt, et donc ses propriétés, nécessite d'étudier les différents mécanismes qui régissent la formation d'une lamelle individuelle et son évolution avec les différents paramètres de déposition. C'est dans ce contexte que le modèle présenté dans ce chapitre a été développé. Le modèle étudie l'impact, l'étalement et la solidification d'une gouttelette micrométrique fondue sur un substrat solide. Il consiste à résoudre les équations de la dynamique des fluides et de la chaleur avec changement de phase dans un fluide multiphasique. Ce chapitre est dédié aussi à la présentation des hypothèses, des équations et de la méthode numérique utilisées. Une étude de sensibilité au maillage spatial et temporelle sera présentée. Enfin une validation du modèle sera réalisée par une comparaison des résultats obtenus par notre modèle avec ceux de l'expérience existants dans la littérature scientifique.

II. 1 Description du problème

Dans cette étude, l'impact d'une gouttelette fondue sur un substrat est modélisé par la résolution des équations de Navier–Stokes et l'équation de l'énergie en incluant le changement de phase liquide/solide, par la méthode CFD dans un domaine 2D axisymétrique, en utilisant le logiciel ANSYS FLUENT 14.0 [97]. Ces équations seront couplées à la méthode de volume de fluide (VOF) pour suivre la surface libre de la gouttelette. Dans le cas de la fusion du substrat, cette dernière est modélisée en résolvant l'équation de l'énergie en incluant le changement de phase liquide/solide dans le substrat. Le mélange entre la gouttelette et la partie fondue du substrat n'est pas considéré. L'interface entre le substrat et la gouttelette ne change pas et reste dans son état initial. De plus l'éjection de matière fondue de substrat ne se produit pas [94]. La tension superficielle à l'interface gouttelette-air a été modélisée comme une force volumique basée sur le modèle Continuum Surface Force (CSF) de Brackbill et al. [98]. La morphologie des lamelles dépendent fortement de l'angle de contact solide-liquide [98]. L'angle de contact, qui est constant ou dépendant de la vitesse de la ligne de contact, est généralement obtenu expérimentalement à travers des photographies agrandies et des mesures de chaque gouttelette spécifique sur un système de substrat. Ainsi, il est difficile d'obtenir la vraie valeur de l'angle de contact pour chaque système. Au lieu de

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

cela, dans cette étude, l'angle de contact est constant. Les hypothèses suivantes ont été retenues pour modéliser mathématiquement le problème :

- a) L'impact des gouttelettes sphériques est normal sur une surface plane;
- b) Le fluide de la gouttelette fondue et du gaz environnant est incompressible, laminaire et Newtonien;
- c) La vitesse de la phase solide est nulle;
- d) Les contraintes tangentielles à la surface libre ont été négligées;
- e) Aucune condition aux limites de glissement et de pénétration n'a été appliquée à la surface du substrat
- f) La résistance thermique de contact et la tension superficielle sont supposées constantes dans le temps;
- g) Les propriétés physiques de la gouttelette, du gaz environnant et du substrat sont constantes
- h) Le transfert de chaleur est dominé par les modes de convection et de conduction, ignorant le rayonnement de la surface des gouttelettes vers les environs.

II. 2 La dynamique de fluide

La dynamique de fluide est modélisée en utilisant la méthode de volume fini. Les équations de la dynamique sont résolues dans un domaine 2D axisymétrique. L'écoulement est considéré incompressible, laminaire et Newtonien, les équations de continuité et de Navier-Stokes sont les suivantes :

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (II.1)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)] + \rho\vec{g} + F_{vol} + S_y \quad (II.2)$$

Où \vec{v} est le vecteur vitesse, P est la pression, \vec{g} est le vecteur de pesanteur, F_{vol} est la force de tension superficielle par unité de volume, $[\mu(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)]$ est le tenseur de contraintes de viscosité, S_y est le terme source, ρ est la densité et μ est la viscosité dynamique.

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

II.2.1 la méthode de volume de fluide (VOF)

la méthode de volume de fluide (VOF) a été employée pour capturer l'interface entre deux fluides immiscibles. Dans cette méthode une fonction scalaire est défini, qui représente une fraction du volume d'une cellule contenant le fluide. Les variables et les propriétés dans l'importe quelle cellule, sont purment représentant d'une phase ou d'un mélange de plusieurs phases qui dépendent des valeurs de fraction de volume. Si on note α_q la fraction de volume du $q^{\text{ème}}$ fluide dans une cellule, quand la cellule est vide de $q^{\text{ème}}$ fluide $\alpha_q = 0$, si α_q est entre 0 et 1, la cellule contient l'interface entre le fluide et un ou plusieurs autres fluides, et si le cellule est pleine de $q^{\text{ème}}$ fluide $\alpha_q = 1$. Le pistage de l'interface en mouvement entre les phases est accompli par la résolution de l'équation de continuité pour la fraction de volume d'une ou de plusieurs phases, pour la $q^{\text{ème}}$ phase, l'équation est la suivante :

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = 0 \quad (II.3)$$

L'équation de la fraction de volume ne sera pas résolue pour la phase primaire, cette dernière sera calculée sur la base de la condition suivante :

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (II.4)$$

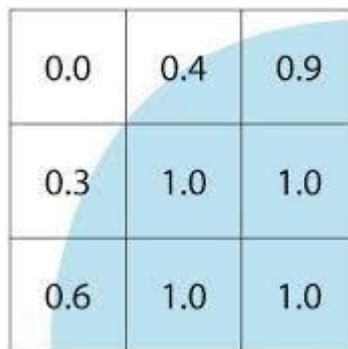


Figure II.1 Représentation schématique des fractions de volume

Les propriétés apparaissant dans les équations de transport sont déterminées par la présence des phases composantes dans chaque volume de control. Dans un système à deux phases, par

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

exemple, si les phases sont représentées par les indices 1 et 2, et si la fraction volumique de la seconde est suivie, la densité dans chaque cellule est donnée par :

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (II.5)$$

En général, pour un système à n phase, la densité moyenne en fraction volumique prend la forme suivante :

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (II.6)$$

Une seule équation de quantité moment est résolue dans tout le domaine et le champ de vitesse résultant correspond à chaque phase. L'équation de quantité de mouvement (II.2), dépend des fractions volumiques de toutes les phases à travers les propriétés ρ et μ .

II.2.2 Modélisation de la tension superficielle (modèle CSF)

Dans les écoulements multiphasiques, les effets de tension superficielle à l'interface entre deux phases sont dus à des forces attractives entre les molécules d'éléments liquides et gazeux. La pression de surface qui agit pour minimiser la zone interfaciale influe considérablement sur la forme de l'interface. Les forces exercées par la tension superficielle à l'interface tendent à équilibrer la différence de pression à travers les fluides, et leurs effets doivent être pris en compte dans l'équation de quantité de mouvement. Brackbill [98] a proposé un modèle de force de surface continue (CSF) pour surmonter la distribution de pression discontinue à l'interface. Dans cette méthode, un terme source volumétrique supplémentaire est introduit dans l'équation de la quantité de mouvement pour tenir compte des effets de la tension de surface. Il peut être montré que la chute de pression à travers la surface dépend du coefficient de tension superficielle σ , et la courbure de surface mesurée par deux rayons dans des directions orthogonales, R_1 et R_2 :

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (II.7)$$

Où p_1 et p_2 sont les pressions dans les deux fluides de chaque côté de l'interface.

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

La courbure de surface est calculée à partir de gradients locaux dans la surface normale à l'interface. Soit n la normale à la surface, définie comme gradient de α_q la fraction volumique de la $q^{\text{ème}}$ phase.

$$n = \nabla \alpha_q \quad (II.8)$$

La courbure, κ , est définie en termes de divergence de l'unité normale, \hat{n} :

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} \quad (II.9)$$

Où

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \quad (II.10)$$

La tension superficielle peut être écrite en termes de saut de pression à travers la surface. La force à la surface peut être exprimée en force volumique en utilisant le théorème de divergence. C'est cette force volumique qui est le terme source qui est ajoutée à l'équation de quantité de mouvement. Il a la forme suivante :

$$\vec{F}_{vol} = \sigma \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_2}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} \quad (II.11)$$

Où ρ est la densité moyenne en volume calculée à l'aide de l'équation II.6. L'équation II.11 montre que le terme source de tension superficielle pour une cellule est proportionnel à la densité moyenne dans la cellule.

II. 2.3 Adhésion à la paroi

L'angle de contact que le fluide est supposé faire avec la paroi est utilisé pour ajuster la surface normale dans les cellules près de la paroi. Cette condition aux limites dite dynamique entraîne l'ajustement de la courbure de la surface près de la paroi. Si θ_w est l'angle de contact à la paroi, alors la surface normale à la cellule à côté de la paroi est :

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta_w + \hat{t} \sin \theta_w \quad (II.12)$$

Où \hat{n}_w et \hat{t} sont les vecteurs unitaires normal et tangentiel à la paroi respectivement. La combinaison de cet angle de contact avec la surface normale calculée normalement à une cellule du mur détermine la courbure locale de la surface, et cette courbure est utilisée pour ajuster le terme de force corporelle dans le calcul de la tension de surface.

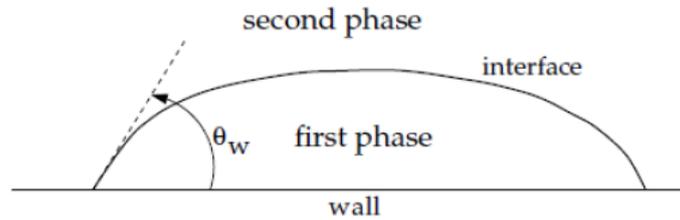


Figure II.2 Diagramme schématisé de l'angle de contact entre les phases.

II.3 Transfert de chaleur et changement de phase liquide/solide

La méthode porosité-enthalpie [99] est utilisée pour modéliser le processus de solidification de la gouttelette et la fusion de substrat. Dans cette méthode l'interface de solidification n'est pas suivie explicitement. Au lieu de cela, une quantité appelée fraction liquide, qui indique la fraction de volume qui est en état liquide, est associée à chaque cellule du domaine. La fraction liquide est calculée à chaque itération, basé sur un équilibre d'enthalpie. La zone pâteuse est une région dans laquelle la fraction liquide est comprise entre 0 et 1. La zone pâteuse est modélisée en tant que milieu pseudo poreux dans lequel la porosité diminue de 1 à 0 lorsque le matériau se solidifie. Dans cette méthode, l'approche de la source de Darcy est utilisée pour modéliser le mouvement dans les zones pâteuses.

Pour commencer, l'enthalpie totale dans la gouttelette ou le substrat est introduite comme la somme de la chaleur sensible h et de la chaleur latente ΔH comme suit :

$$H = h + \Delta H \tag{II.13}$$

Où :

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \tag{II.14}$$

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

Où h_{ref} et T_{ref} sont respectivement la chaleur sensible et la température de référence, et C_p est la chaleur spécifique à pression constante. La fraction liquide β est définie comme :

$$\begin{aligned} \beta &= 0 && \text{if } T < T_{solidus} \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} && \text{if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ \beta &= 1 && \text{if } T > T_{liquidus} \end{aligned} \quad (II.15)$$

En fait, la fraction liquide β indique la fraction de chaque cellule remplie de matériau liquide. Le deuxième terme dans la relation (II.15), représente la zone pâteuse, dans cette dernière, β est entre 0 et 1. Si le matériau solidifie dans une cellule, β diminue de 1 jusqu'à 0. Par la définition de la fraction liquide, on peut écrire le terme de la chaleur latente :

$$\Delta H = \beta L \quad (II.16)$$

Où L est la chaleur latente de fusion du matériau, et ΔH peut varier entre 0 pour le solide et L pour le liquide. L'équation de l'énergie pour des problèmes de solidification/fusion peut être écrite comme :

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (II.17)$$

Où H est l'enthalpie par unité de volume, k est la conductivité thermique, et S_h est le terme source. Le terme source qui apparait du côté droit dans Eq. (II.17) est exprimé comme suit :

$$S_h = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H) + \nabla(\rho v \Delta H) \quad (II.18)$$

Comme mentionné ci-dessus, la zone pâteuse est modélisée en utilisant la fraction liquide β . Quand β diminue pendant la solidification dans une cellule, la vitesse de l'écoulement tend vers 0. Ce procédé est accompli en utilisant le terme source S_y pour modifier l'équation de la quantité de mouvement Eq (2). Le terme source dans l'Eq (2) est défini comme suit :

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

$$S_y = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} v \quad (II.19)$$

Où ε est un petit nombre (0.001) pour éviter l'indétermination. A_{mush} est une constante de la zone pâteuse, elle spécifie la pente avec laquelle la vitesse chute vers 0, pendant que le matériau solidifie. Dans cette étude la valeur retenue de la constante A_{mush} est 10^9 [100]. En réalité l'air est enfermé dans les cavités de rugosité de la surface de substrat qui agit en tant qu'une résistance thermique. Pour prendre en compte le contact imparfait entre la gouttelette et le substrat, une résistance thermique de contact est retenue.

Le contact thermique à l'interface gouttelette/substrat est contrôlé par une résistance thermique de contact R_{th} , pour les fractions liquides inférieures à 1. Cette résistance thermique de contact est introduite pour modifier la conductivité de fluide à l'interface de la paroi par la relation :

$$q = \frac{(T - T_w)}{(l/k + R_{th}(1 - \beta))} \quad (II.20)$$

Où T , T_w et l ont définis dans la figure II.3, k est la conductivité thermique du fluide, β est la fraction liquide et R_{th} est la résistance thermique de contact, elle est considérée constante dans le modèle, bien que celle-ci varie dans le temps et dans l'espace (durant l'étalement et la solidification de la gouttelette).

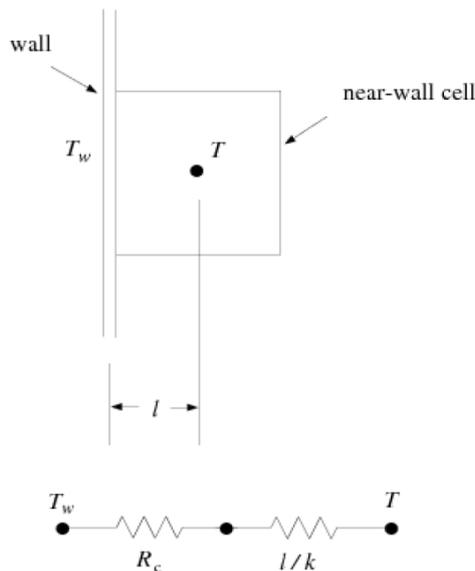


Figure II.3 Circuit schématique de l a résistance thermique de contact [97].

II.4 Résolution numérique

II.4.1 Un aperçu de la méthode CFD typique

Dans cette étude, le code commercial de volume fini CFD (Computational Fluid Dynamics) Ansys Fluent 14 a été utilisé pour modéliser l'étalement et la solidification de la gouttelette sur un substrat. Un processus typique de simulation CFD comprend cinq étapes principales, illustré par la figure II.4

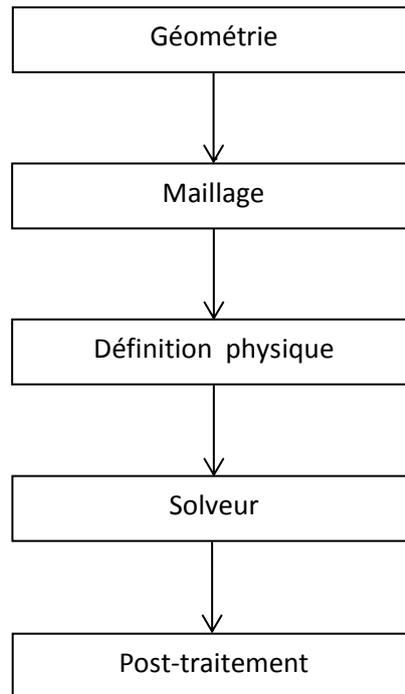


Figure II.4 Processus typique d'une simulation CFD.

II.4.2 Géométrie du domaine

Un domaine 2D-axisymétrique est considéré pour la simulation. Le domaine de calcul est composé de deux sous domaines rectangles, le premier correspond au domaine de la gouttelette, dans lequel sont résolues les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie durant l'impact, l'étalement et la solidification de la gouttelette. Le deuxième, situé en dessous représente le substrat sur lequel le domaine de la gouttelette évolue, et où seule l'équation de l'énergie est résolue. La surface du substrat est un plan commun aux deux parties du domaine de calcul (Figure II.5). Afin de réduire le temps de

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

calcul, la moitié du domaine est utilisée pour la simulation. La création de la géométrie est réalisée par Ansys Design Modeler.

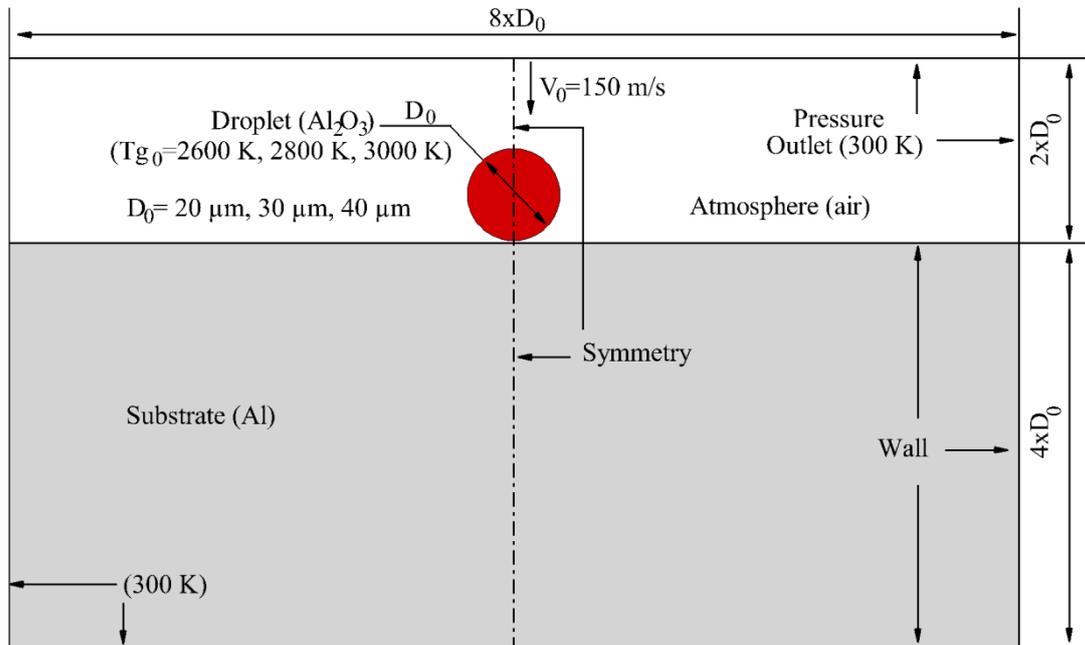


Figure II.5 Domaine 2D axisymétrique pour la simulation de l'impact de la gouttelette sur le substrat.

II.4.3 Maillage du domaine

Le maillage du domaine de la gouttelette est rectangulaire structuré, qui dépend du paramètre CPR (Cells Per initial droplet Radius), il définit le nombre de mailles par rayon initial de la gouttelette. Le choix du CPR conditionne le maillage du domaine dans lequel se produisent l'impact, l'étalement et la solidification. Les dimensions du domaine doivent être assez larges pour contenir la formation de la lamelle. Le nombre de mailles dans chaque direction du domaine est calculé en fonction du CPR comme suit :

$$N_i = \frac{\text{Dimension du domaine}}{\text{Rayon de la gouttelette}} \times CPR \quad (II.21)$$

Où N_i est le nombre de mailles suivant une direction principale du domaine de calcul. Il s'avère donc que le choix du CPR est crucial pour les simulations.

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

Pour le substrat, dans un premier temps, il faut déterminer l'épaisseur minimal du substrat acceptable pour le calcul, de telle sorte qu'elle ne soit pas à la fois :

- a. Trop faible et affect la diffusion de la chaleur en son sein ;
- b. Trop épaisse et augmente inutilement le maillage et par conséquent le temps de calcul.

Le maillage dans la direction X est identique à celui de la gouttelette. Le Maillage du substrat dépend donc de son épaisseur dans la direction Y. Le choix de maillage du substrat est crucial du point de vue thermique, car c'est vers lui que la gouttelette fondu cède sa chaleur par conduction. Comme son maillage est indépendant du CPR dans la direction Y, il est possible de considérer un raffinement du maillage. Cette configuration est essentielle pour étudier le transfert thermique au voisinage de l'interface gouttelette/substrat (Figure II.6). Le maillage et la définition des frontières appropriées au domaine considéré (parois, interfaces fluide ...) sont créés par Ansys Meshing.

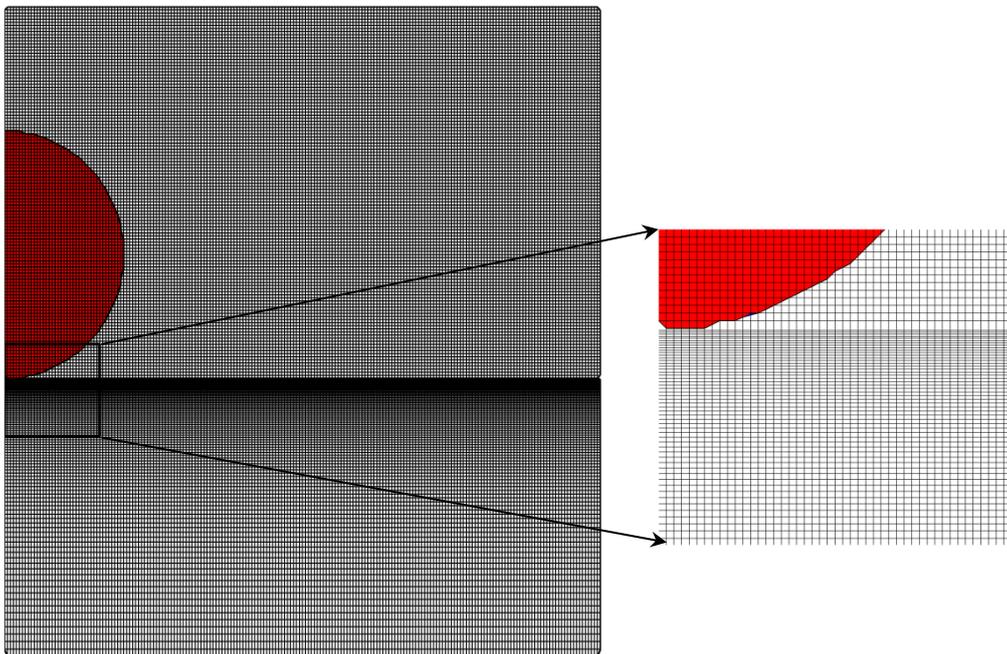


Figure II.6 Maillage typique pour les simulations (CPR=40).

II.4.4 Solveur

Toutes les équations gouvernantes sont résolues à l'aide du solveur basé sur la pression dans FLUENT. Les équations de l'énergie et de quantité de mouvement ont été discrétisées à l'aide du schéma QUICK. Le couplage pression-vitesse a été réalisé par la méthode PISO pendant le calcul transitoire. Le schéma CICSAM (Compressive Interface

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) a été appliqué pour discrétiser l'équation de volume de fluide (VOF). Le schéma CICSAM est approprié pour les fluides, où le rapport de viscosité est très important (supérieur à 10^3), le cas de notre étude. Les gradients de variables dans les équations ont été calculés à l'aide de la méthode Green-Gauss Node based pour obtenir une précision spatiale de second ordre. Les valeurs de pression ont été interpolées à l'aide du PRESTO! approche dans les cellules de calcul. Une formulation implicite de premier ordre a été utilisée pour la discrétisation temporelle avec un pas constant. Pour tout calcul itératif, l'utilisation d'une méthode de relaxation pour ralentir ou accélérer la convergence est nécessaire. Pour cette étude les facteurs de sous-relaxation sont indiqués dans le tableau II.1

Tableau II.1 Facteur de sous relaxation.

Variabes	Facteur de sous-relaxations
Pression	0.3
Densité	1
Force de volume	1
Quantité de mouvement	0.7
Fraction liquide	1

II.4.5 Choix des paramètres de discrétisation

Afin de s'assurer de l'indépendance des résultats du maillage spatiale est temporel, des essais numériques ont été réalisés. Le choix de ces paramètres de discrétisation est illustré sur un cas test. Pour cela, des simulations ont été effectuées sur le cas d'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) fondue de 40 μm de diamètre, initialement à 2800 K, avec une vitesse d'impact de 100 m/s, sur un substrat solide en acier inoxydable 304L initialement à 450 K. De plus, une résistance thermique de contact de valeur $10^{-7} m^2K/W$ a été supposée entre la gouttelette et le substrat.

II.4.5.1 Effet du pas d'espace

Les tests portant sur le maillage spatial ont été effectués avec un pas de temps inférieur de plusieurs ordres de grandeurs à la durée du transitoire. Cinq grilles correspondantes à un CPR de 20, 30, 40, 45 et 50 ont été testées pour un pas de temps de $10^{-11} s$. Un raffinement

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

est effectué au niveau de la surface supérieur du substrat (interface gouttelette/substrat) afin de capturer les forts gradients de la solution. En commençant avec un maillage assez grossier vers un maillage plus raffiné, les résultats ont été comparés jusqu'à ce que le raffinement n'a plus d'influence considérable sur la solution, d'où l'indépendance de la solution du maillage. Pour notre étude un CPR de 40 est retenu pour le maillage du domaine de calcul (figure II.7).

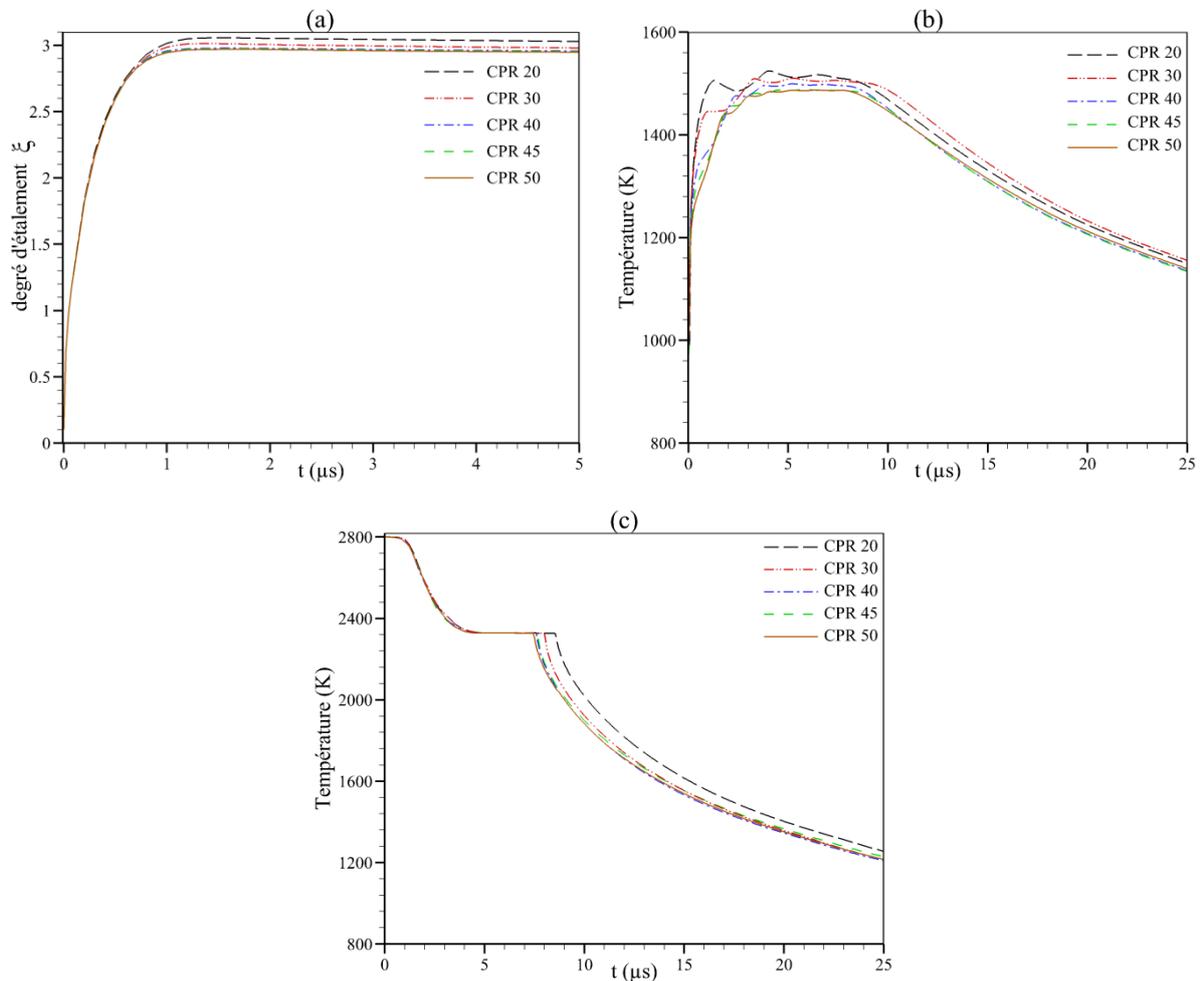


Figure II.7 Test du maillage sur le degré d'étalement (a), historique de la température à la surface supérieure du substrat (b) et historique de la température à la surface supérieure de la gouttelette (c).

II.4.5.2 Effet du pas de temps

Plusieurs pas de temps ont été testés, de $5 \times 10^{-11} \text{ s}$ à 10^{-9} s avec un maillage spatiale correspondant à un CPR de 40. Pour la valeur de 10^{-9} s la température au niveau de la surface supérieure du substrat est surestimée. Lorsque le pas est réduit d'un ordre de grandeur

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

de 10^{-10} s, la résolution augmente et la température à l'interface gouttelette/substrat est mieux estimée. Au-delà 10^{-10} s la solution n'est guère améliorée (figure II.8) par contre le temps de calcul est grandement affecté. Le pas de 10^{-10} s et le maillage correspondant à un CPR de 40 donne le meilleur choix garantissant un compromis entre précision et temps de calcul. Il sera adopté pour la suite dans les simulations.

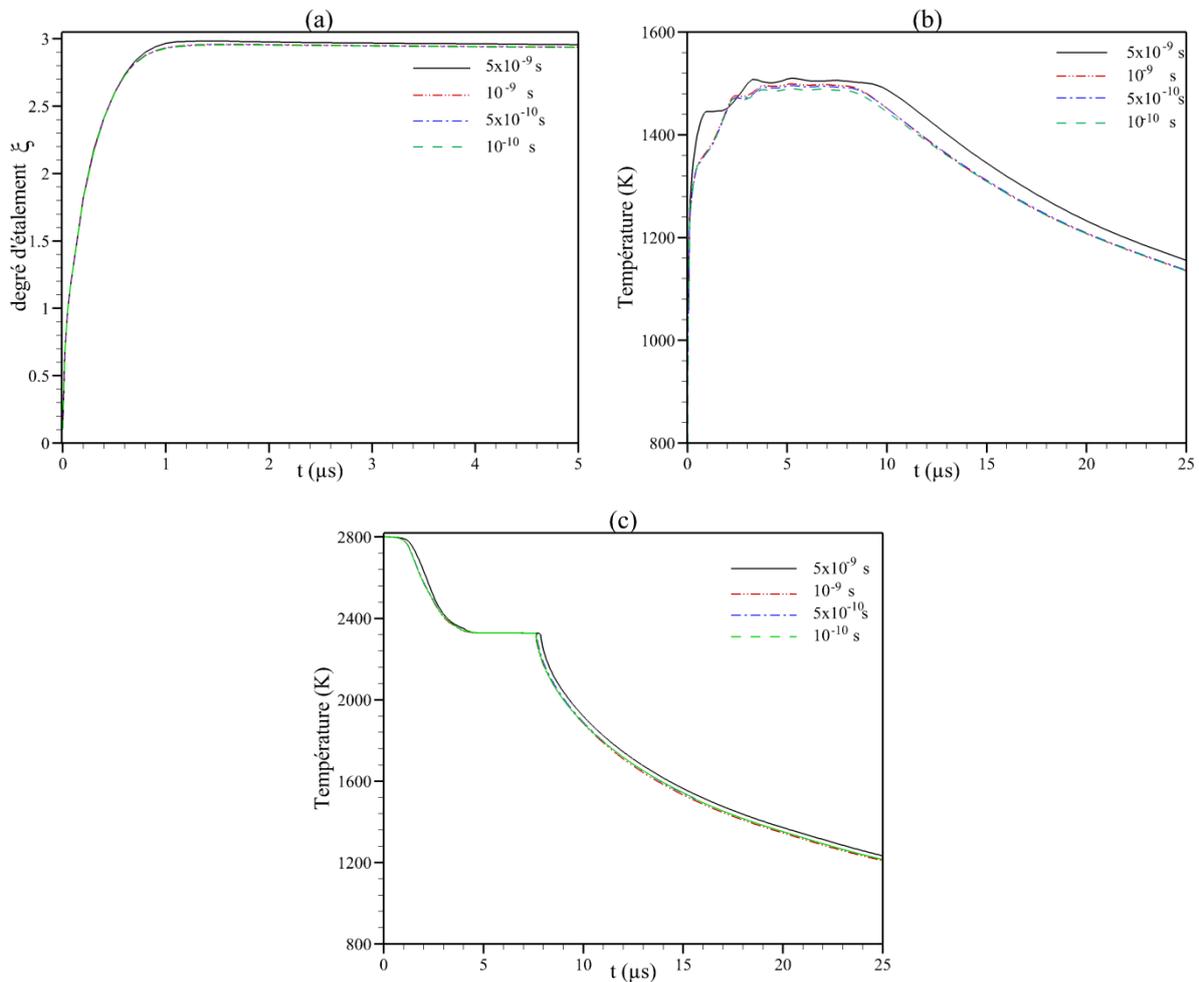


Figure II.8 Test du pas de temps sur le degré d'étalement (a), historique de la température à la surface supérieure du substrat (b) et historique de la température à la surface supérieure de la gouttelette (c), pour un CPR 40.

II.5 Validation du modèle

S'agissant dans le présent travail de développer un modèle numérique pour simuler des phénomènes physiques couplés et non linéaires tel que la dynamique de fluide, le transfert de chaleur avec le changement de phase et les écoulements multiphasiques pour traiter le problème de construction du dépôt, une étape de validation de ce modèle est nécessaire avant

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

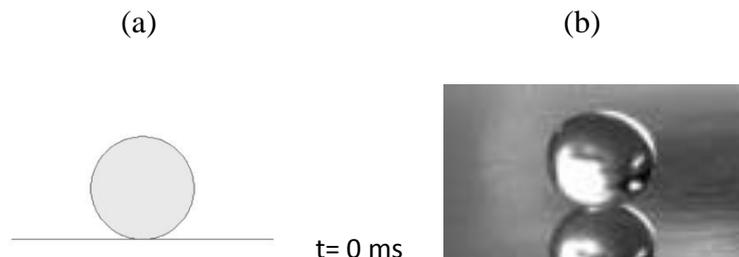
toute étude paramétrique. Cette validation est basé sur la comparaison entre des résultats obtenus par notre modèle et ceux expérimentaux obtenus par autres auteurs [101, 102, 105], qui ont le plus souvent travaillé sur des goutte millimétriques.

II.5.1 Cas d'impact d'une goutte d'eau sur une surface solide

Le premier cas de validation concerne le dépôt d'une goutte d'eau de 3 mm de diamètre impactant une surface solide avec une vitesse de $V_0 = 1,18 \text{ m/s}$. Le domaine de calcul est constitué seulement du domaine de la goutte en 2D axisymétrique, le substrat est considéré comme une paroi où la condition à la limite de non glissement est appliquée. Un CPR de 40 a été utilisé pour le maillage du domaine de dimension 10 mm x 4mm. Seulement les équations de Navier – Stocks couplée à la méthode VOF sont résolues dans ce domaine, les propriétés de l'eau sont présentées dans la table II.2. Sur la Figure II.9 est illustrée la comparaison entre les résultats obtenus par la simulation et ceux obtenus expérimentalement par R.Rioboo [101]. D'après la simulation (Figure II.9a), la goutte a une forme sphérique avant l'impact, et immédiatement après l'impact, elle commence à s'étaler dans la direction radiale sous l'effet de la force d'inertie. La goutte atteint son étalement maximal à 3.14 ms (figure II.10), à cet instant la goutte est sous forme d'un disque aplati avec accumulation de masse aux bords. Sous l'effet de la force de tension superficielle, la goutte commence à reculer juste après son étalement maximal. D'après la figure II.9b représentant le résultat expérimental obtenu par R.Rioboo [101], les résultats obtenus par simulation (figure II.9a) sont en très bon accord avec les résultats obtenus expérimentalement.

Tableau II.2 Propriétés physiques de l'eau.

Masse volumique (Kg/m^3)	Viscosité (Pa.s)	Tension superficielle (N/m)
996	1×10^{-3}	0.073



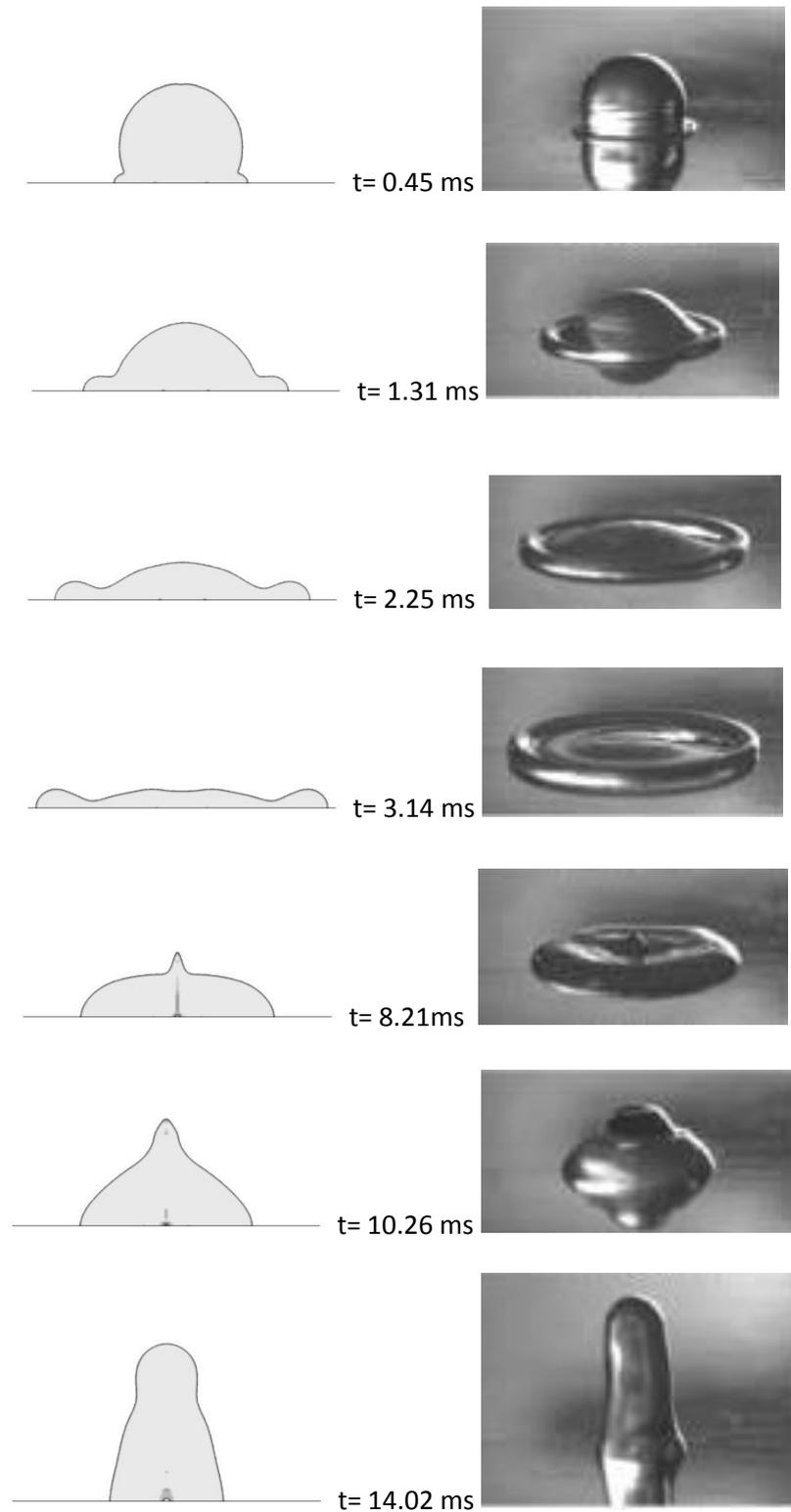


Figure II.9 Impact et étalement d'une goutte d'eau de 3 mm de diamètre avec une vitesse de $V_0 = 1,18 \text{ m/s}$, (a) simulation, (b) résultat expérimental obtenus par R.Rioboo [101].

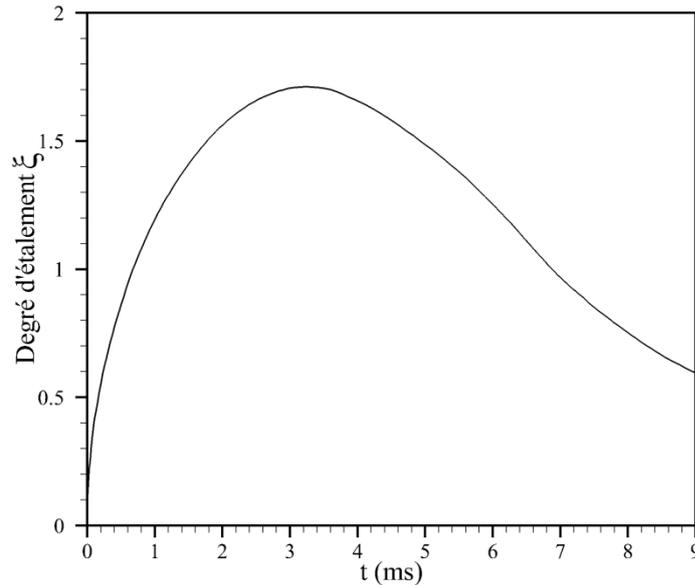


Figure II.10 Evolution temporelle du degré d'étalement de la goutte d'eau de 3 mm de diamètre avec une vitesse d'impact de $V_0 = 1,18 \text{ m/s}$.

II.5.2 Cas d'impact d'une goutte d'étain sur un substrat en acier inoxydable

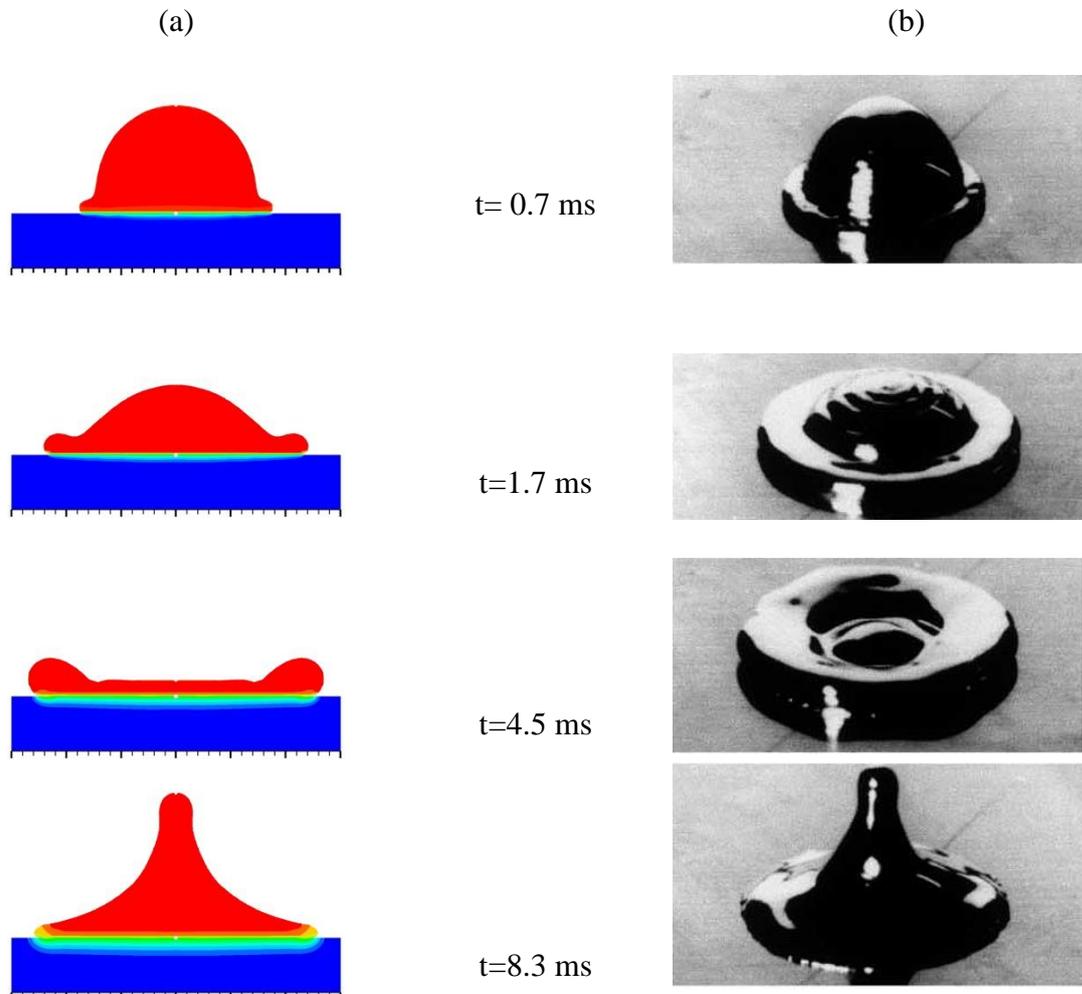
Le deuxième cas choisi pour valider le modèle, est la comparaison des résultats obtenus par la simulation, de l'impact d'une goutte d'étain fondue de 2,7 mm de diamètre à 513 K avec une vitesse initiale de 1 m/s sur un substrat en acier inoxydable initialement à 300 K, avec ceux obtenus expérimentalement par Aziz et Chandra [102]. Pour les simulations, un domaine de 9 mm x 8 mm est retenu, le substrat est de 3 mm profondeur. Un CPR de 40 est utilisé pour le maillage structuré avec un raffinement à l'interface goutte/substrat. Cette dernière est représentée par une résistance thermique de contact de $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ pour prendre en compte le contact imparfait entre la goutte et le substrat. Les propriétés physiques de la goutte d'étain et du substrat en acier inoxydable sont présentées dans la table II.3.

Tableau II.3 Propriétés physiques de l'étain et du substrat en acier inoxydable.

Propriétés	Etain	Acier inoxydable
Densité (kg/m^3)	6970	7930
Conductivité thermique (W/m K) (sol)	62.2	16.3
Conductivité thermique (W/m K) (liq)	33.6	-
Chaleur spécifique (J/kg K) (sol)	244	540
Chaleur spécifique (J/kg K) (liq)	244	-
viscosité (Pa.s)	1.92×10^{-3}	-
Tension superficielle (N/m)	0.50	-
Point de fusion (K)	505	-
Chaleur latente de fusion (J/kg)	59.2×10^3	-

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

La figure II.11 montre la comparaison entre les résultats obtenus par la simulation et par l'expérience. Il est bien claire sur la figure II.11a, qu'après l'impact, la goutte s'étale sur le substrat et s'aplatie, pour former un disque avec les bords surélevés. La goutte atteint son étalement maximal à $t=4.5$ ms. A cet instant une couche solidifiée se forme à l'interface goutte/substrat. Cependant, il reste une partie de la goutte fondue au-dessus de la couche solide, que les forces de tension superficielle l'empêchent de s'étaler davantage et l'obligent de reculer. La périphérie de la goutte est solidifiée à ce moment-là, de sorte que le diamètre de la lamelle ne change plus (figure II.12). A $t=11.3$ ms un étranglement s'est produit dans la colonne de liquide, qui a été bien reproduit par le modèle. La gravité et la tension superficielle ont tiré le liquide jusqu'à ce qu'il retombe sur la couche solide et forme une surface supérieure arrondie ($t=17.3$ ms). Ces résultats montrent un bon accord qualitatif entre les simulations et l'expériences.



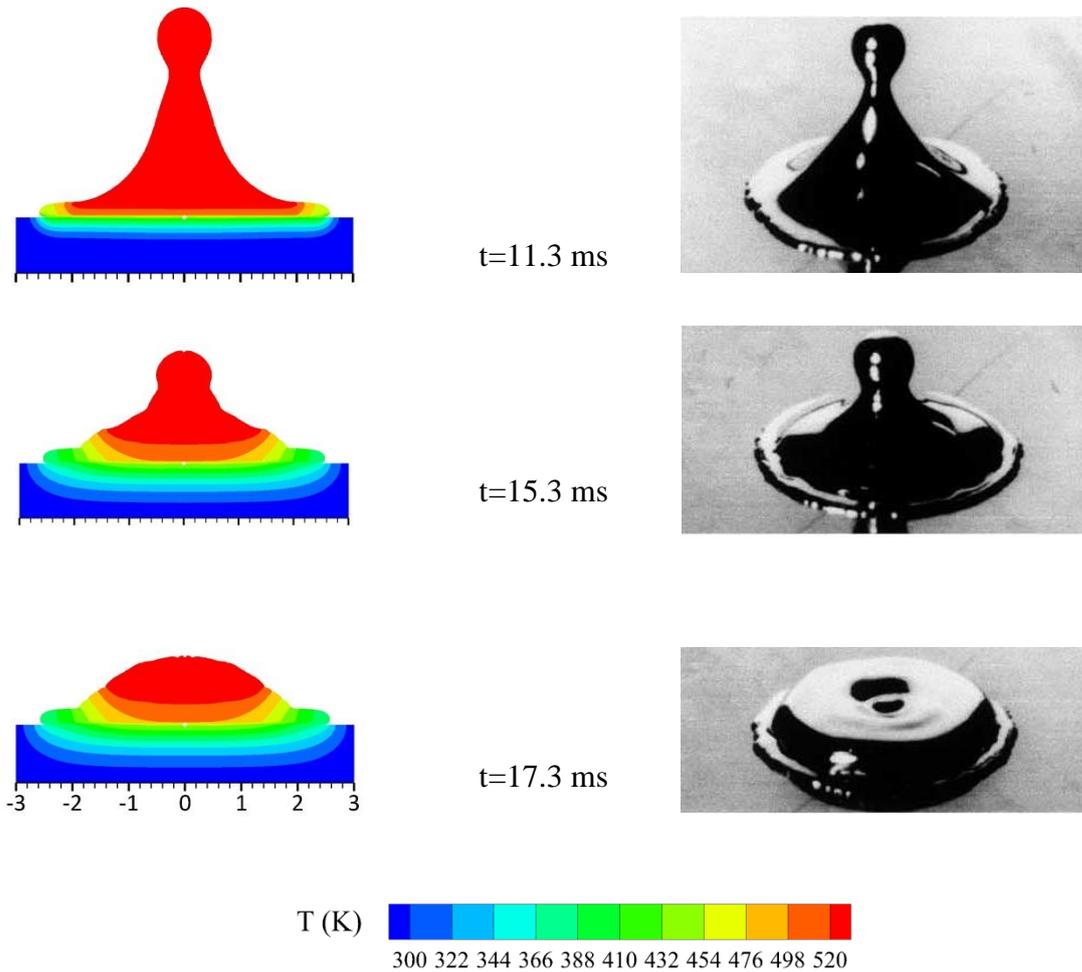


Figure II.11 Etalement d'une goutte d'étain de 2,7 mm de diamètre à 513K, avec une vitesse d'impact de 1 m/s un substrat en acier inoxydable initialement à 300 K, (a) étalement et distribution de la température obtenu par simulation (b) résultat expérimental [102].

Pour comparer les deux résultats qualitativement, la comparaison du degré d'étalement des gouttes obtenu par la simulation et l'expérience est nécessaire. Le degré d'étalement de la goutte a été quantifié en mesurant le diamètre de la lamelle à des périodes successifs pendant l'étalement de la goutte. Le degré d'étalement mesuré [102] et simulé pendant l'impact de la goutte est présenté sur la figure II.12. La concordance avec l'expérience est très bonne, car le degré final du modèle est de 1.83 contre 1.9 obtenu par les mesures, ce qui représente 3.7% de différence.

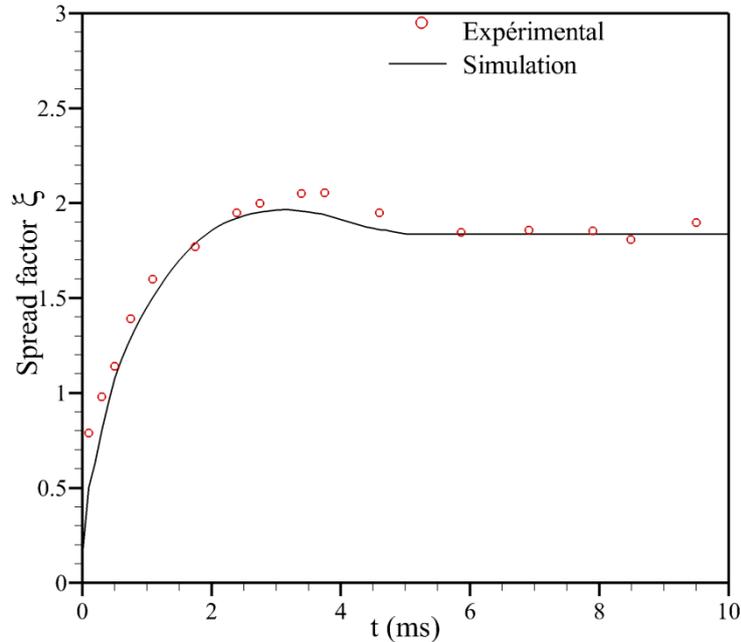
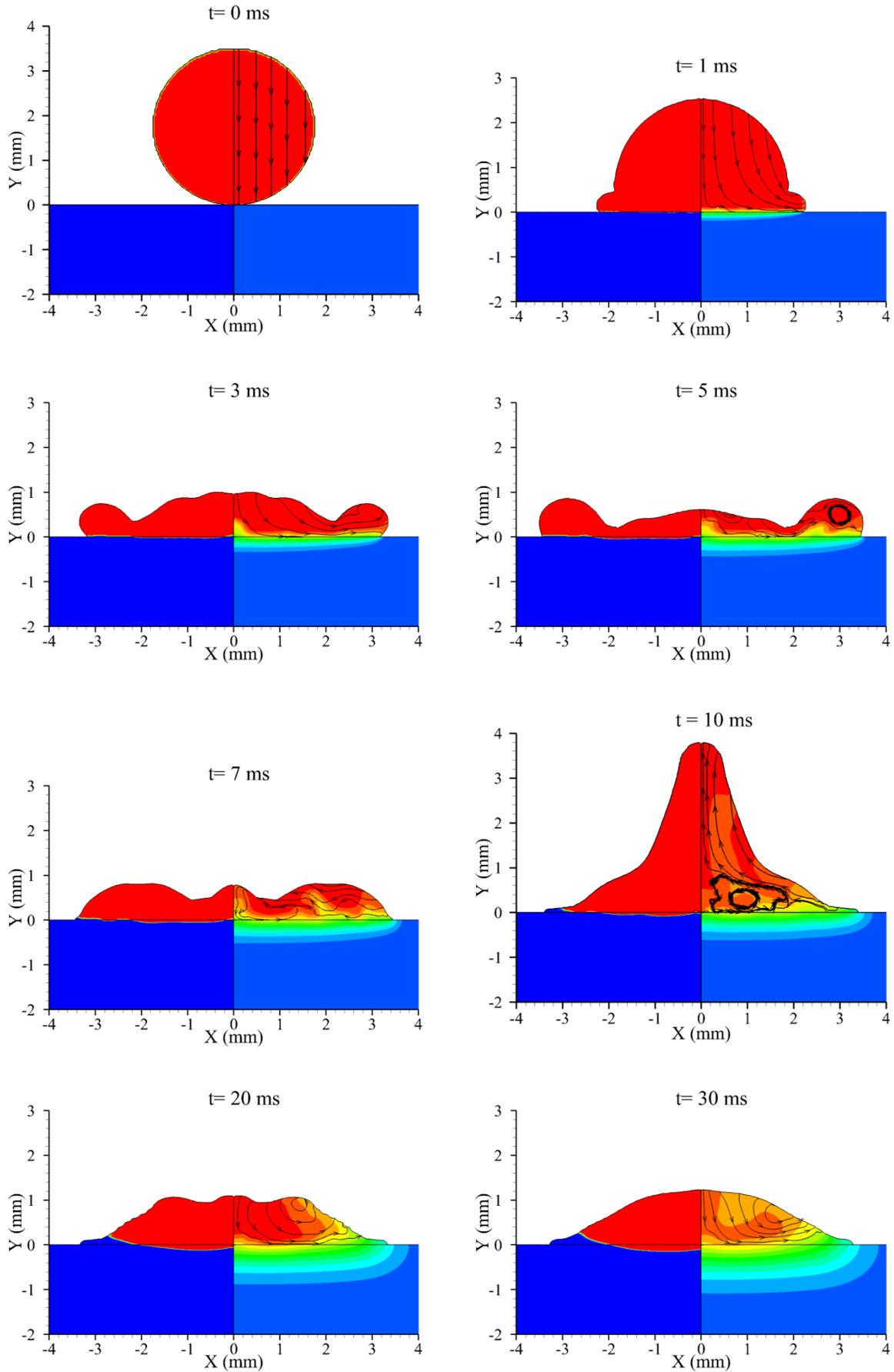


Figure II.12 Evolution du degré d'étalement calculé [103] par rapport aux résultats expérimentaux [102], le cas l'impact d'une gouttelette d'étain de 2,7 mm de diamètre à 513 K, avec une vitesse de 1 m/s.

II.5.3 Cas de fusion du substrat en acier inoxydable

Le troisième cas de validation, concerne la comparaison entre le résultat obtenu par la simulation d'impact et l'étalement d'une goutte millimétrique en considérant la fusion du substrat, avec le résultat expérimental et numérique obtenu par Zarzalejo et al [89]. La figure II.13 représente les résultats obtenus par simulation de l'impact, dans les conditions expérimentales, d'une goutte d'acier inoxydable (308), de 3.5 mm de diamètre à une température initiale de 2773 K, avec une vitesse de 1 m/s sur un substrat de même matériau à 300 K. L'étalement de la goutte commence juste après l'impact dans la direction radiale, la goutte atteint son étalement maximal pratiquement à 3 ms. A cause de la diminution des forces d'inerties ainsi que la solidification des bords, à cet instant le substrat commence à fondre dans la partie centrale. A 5 ms le phénomène du recul de la goutte commence sous l'effet des forces de tension superficielle. Des tourbillons apparaissent aux bords de la goutte ainsi que des lignes de courants dans le sens inverse de l'étalement. Le liquide forme une colonne, qui retombe plus tard sur la partie centrale (20 ms). La fusion du substrat progresse ainsi que la solidification de la goutte. Le substrat atteint sa fusion maximale à 30 ms, pour qu'il commence à se resolidifier.

Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique



Chapitre II : Modèle physique et résolution numérique

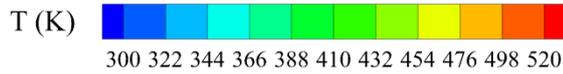


Figure II.13 Étalement d'une goutte d'acier inoxydable (308), de 3.5 mm de diamètre à une température initiale de 2773 K, avec une vitesse de 1 m/s sur un substrat de même matériau à 300 K. A gauche de chaque image fraction liquide, à droite la distribution de la température et les lignes de courants.

La figure II.14a illustre le résultat expérimental, la région de substrat fondu ainsi que le front de fusion sont clairement observés. La figure II.14b montre le résultat obtenu par le modèle numérique de Zarzalejo et al [89], ce modèle est basé seulement sur la modélisation du transfert de chaleur par conduction et de solidification, il ne prend pas en considération la dynamique de fluide lors de l'étalement de la goutte. Les dimensions de cette dernière sont prises par rapport au résultat expérimental après solidification totale de la goutte. Pour prendre en considération l'effet de la convection, ils ont multipliés la conductivité du fluide par un facteur pour avoir une conductivité « efficace ». La figure montre les isothermes et le front de fusion dans le substrat.

La figure II.14c représente le résultat de la même simulation obtenu par le modèle proposé, qui prend en charge l'accouplement complexe entre la dynamique des fluides le transfert de chaleur et la solidification. A gauche de la figure la région fondue du substrat (rouge) ainsi que la partie solidifiée de la goutte (bleu) sont observés. A droite le champ de température ainsi que le front de fusion dans le substrat sont illustrés. Une très bonne concordance est constatée entre l'expérimental et la simulation concernant la région fondue du substrat. La profondeur maximale de la région fondue dans le substrat prévue par la simulation est 92.3 μm , qui est très comparable avec celle mesurée par l'expérimentale (98 μm). Par contre la profondeur maximale prévue par le modèle de Zarzalejo et al [89] (94.7 μm), est retenue pour une conductivité efficace en tant que celle qui donne la bonne concordance avec l'expérience.

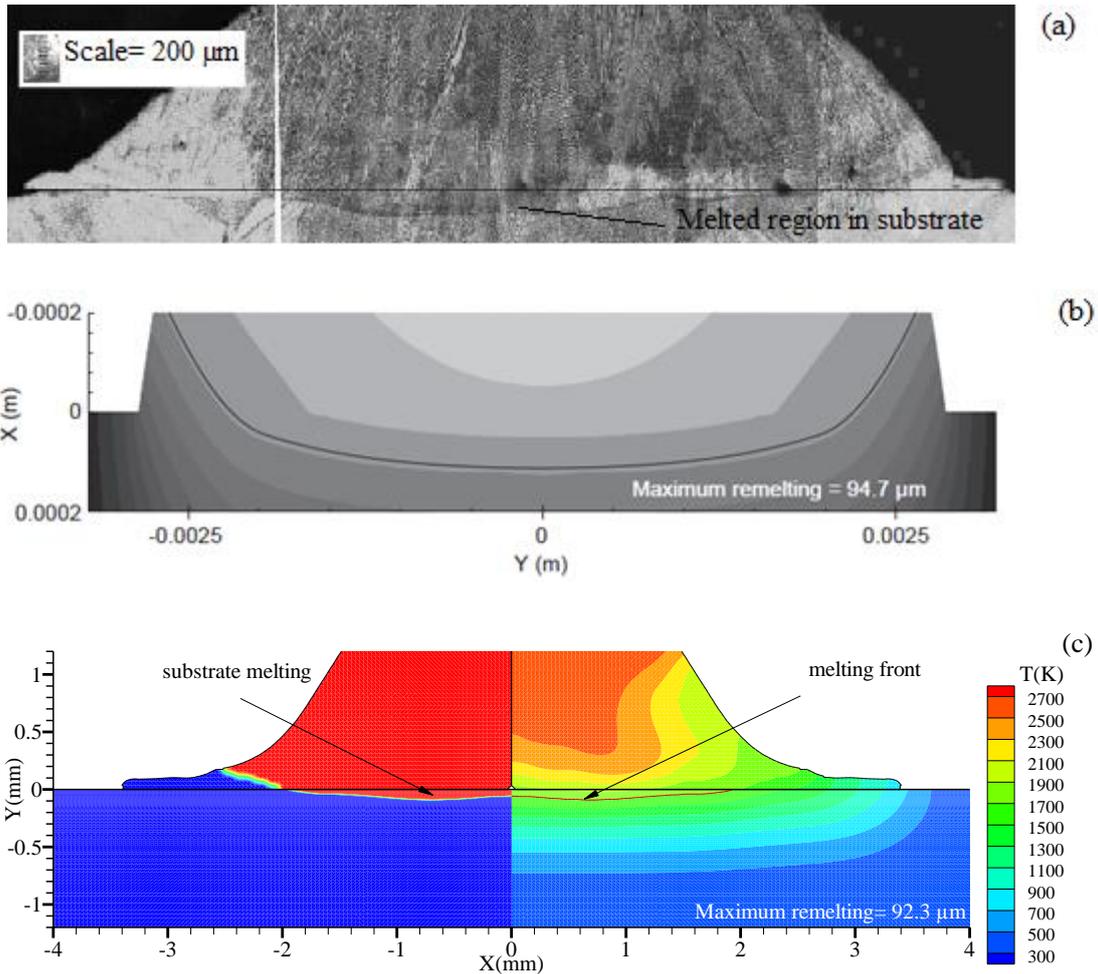


Figure II.14 front de fusion dans un substrat obtenu expérimentalement (a) [89], comparé avec deux modèles numériques (b) modèle de Zarzalejo et al [89] et (c) présente étude [96].

Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, la formulation mathématique du modèle utilisé dans cette étude. Celui-ci est basé sur un certain nombre d'hypothèses qui permettent la résolution des équations de Navier – Stokes, de la chaleur avec le changement de phase couplées à la méthode (VOF), dans un système d'impact d'une gouttelette micrométrique en céramique sur un substrat solide métallique, en prenant en compte la résistance thermique de contact à l'interface gouttelette/substrat. La discrétisation des équations est effectuée à l'aide de la méthode des volumes finis dans un domaine 2D axisymétrique. L'étude de sensibilité au maillage spatial et temporelle a permis de choisir les paramètres de discrétisations, pour un bon compromis entre précision et temps de calcul. La validation du modèle proposé a assuré une certaine crédibilité des résultats.

Introduction

Dans ce chapitre l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de notre travail de recherche est présenté, concernant principalement l'étude de dépôt d'une particule micrométrique en céramique entièrement fondue sur un substrat métallique solide. La première partie de ce chapitre est une étude détaillée d'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en acier inoxydable (304L). L'influence de la vitesse d'impact, la température initiale de la gouttelette ainsi que la température initiale du substrat sur l'étalement et la solidification de la gouttelette, sont examinées. Dans la deuxième partie, la fusion du substrat est étudiée, lors de l'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en aluminium (Al). L'effet de la taille et la température initiale de la gouttelette sur l'étalement et la solidification de la gouttelette ainsi que sur la fusion du substrat est étudié.

III.1 Impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en acier inoxydable

Dans cette étude, l'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en acier inoxydable (304L) dans les conditions de projection plasma est examiné. La température, le diamètre et la vitesse initiaux de la gouttelette sont 2800 K, 40 μm et 100 m/s, respectivement. Le substrat est préchauffé à 450 K, l'interface entre la gouttelette et le substrat est représenté par une résistance thermique de contact de $10^{-7} \text{m}^2 \text{K/W}$. Les dimensions du domaine de calcul ainsi que les conditions aux limites sont mentionnées dans la Figure III.1. Un domaine 2D-axisymétrique est considéré pour la simulation. Les parois du côté et du fond de substrat sont maintenues à une température de 300 K. les limites extérieures du domaine de la gouttelette sont considérées comme sortie de pression et sont maintenues aussi à une température de 300 K. La profondeur du substrat a été choisie pour garantir que la température de surface inférieure du substrat est constante et égale à 450 K. Les propriétés thermo physiques de l'alumine et de l'acier sont données dans la table III.1. L'évolution de la pression, la vitesse, la température, la solidification et l'étalement de la gouttelette seront examinées en détail.

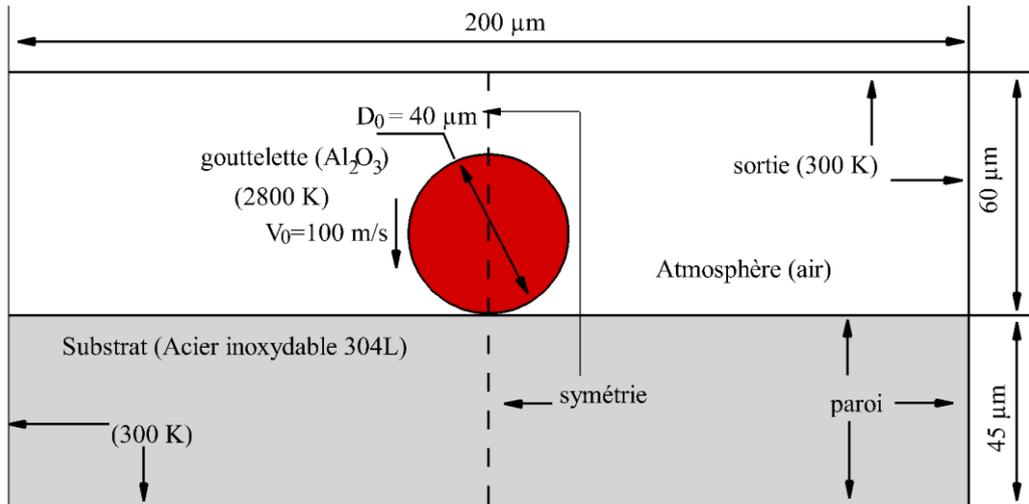


Figure III.1 Domaine 2D axisymétrique pour la simulation de l'impact de la gouttelette sur le substrat.

Tableau III.1 Propriétés physiques de la gouttelette d'alumine (Al_2O_3) et du substrat en acier inoxydable (304L).

Propriétés	Alumine (Al_2O_3)	Acier inoxydable (304L)
Densité (kg/m^3)	3990	7930
Conductivité thermique (W/m K) (sol)	5.9	16.3
Conductivité thermique (W/m K) (liq)	7.86	-
Chaleur spécifique (J/kg K) (sol)	1273	540
Chaleur spécifique (J/kg K) (liq)	1358	-
Viscosité cinématique (m^2/s)	1.026×10^{-5}	-
Tension superficielle (N/m)	0.69	-
Point de fusion (K)	2327	1673
Chaleur latente de fusion (J/kg)	1.16×10^6	-

III.1.1 Champs de pression

La figure III.2 montre l'évolution de la pression lors de l'impact et l'étalement de la gouttelette sur le substrat. Lorsque la gouttelette fondue frappe le substrat solide, la vitesse de la gouttelette diminue rapidement et son énergie cinétique est convertie en énergie potentielle, ce qui provoque une augmentation de pression à l'interface gouttelette/substrat (figure III.3a). La pression au point de contact augmente jusqu'à une valeur très élevée (190 MPa environ) en un laps de temps très court ($0,005 \mu\text{s}$).

Chapitre III : Résultats et discussions

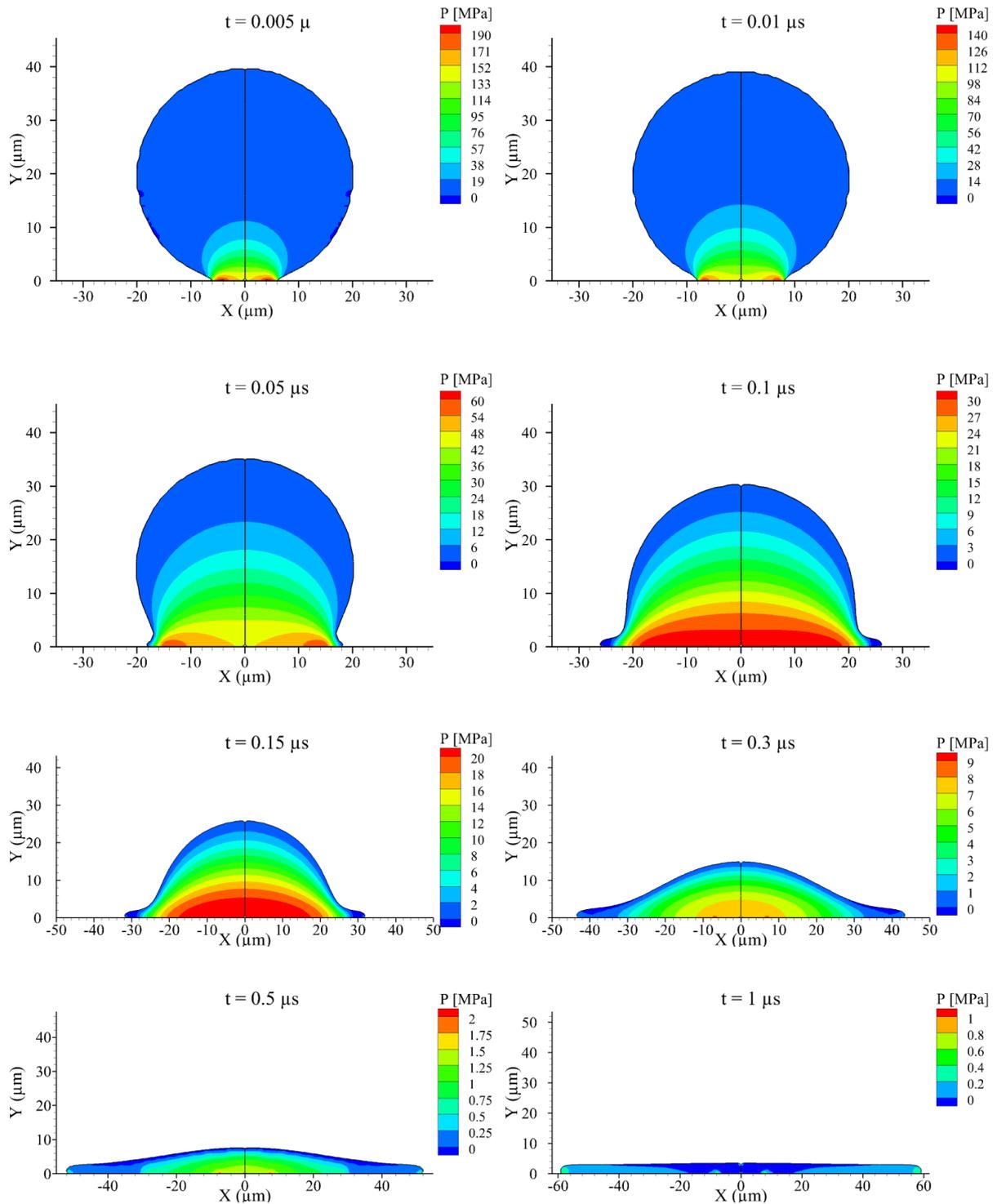


Figure III.2 Champs de la pression lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K. La résistance de thermique de contact à l'interface lamelle/substrat est de $10^{-7} \text{m}^2 \text{K}/\text{W}$.

Chapitre III : Résultats et discussions

En raison de la très haute pression à l'intérieur de la gouttelette, la gouttelette se déforme et s'étale radialement. Au fur et à mesure que la gouttelette s'étale sur le substrat, la pression diminue rapidement. A $0.01 \mu\text{s}$ et à $0.05 \mu\text{s}$ la pression maximale diminue jusqu'à environ 140 MPa et 60 MPa respectivement, on remarque aussi que ce maximum de pression se déplace du centre vers l'extrémité de la gouttelette (figure III.3b). Cette onde de pression se propage dans la gouttelette, sans pour autant atteindre toute la gouttelette. Quand la gouttelette commence à s'étaler (à $0.1 \mu\text{s}$ et $0.15 \mu\text{s}$) la répartition de la pression devient uniforme dans la direction radiale, mais elle est relativement importante près du substrat.

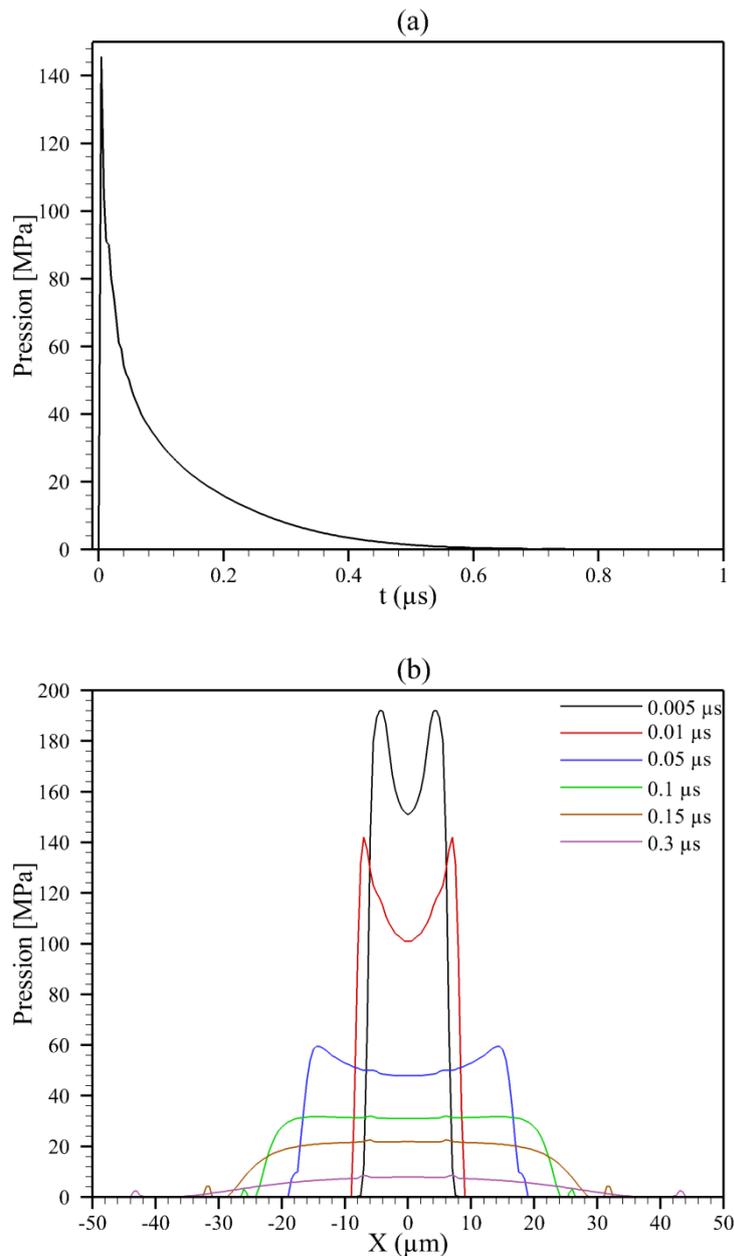


Figure III.3 Variation temporelle de la pression au point de contact avec le substrat (a), répartition de la pression le long de la surface du substrat à différents moments (b).

Chapitre III : Résultats et discussions

Au fil du temps, la pression dans toute la gouttelette étalée se réduit à la pression ambiante, comme le montre la figure III.3b. La variation temporelle de la pression est illustrée dans la figure III.3a, au point de contact gouttelette/substrat, la pression atteint en un temps très court la valeur de 150 MPa, puis elle diminue rapidement pour atteindre la pression ambiante à 0.5 μ s. La figure III.3b montre la répartition de pression le long de la surface du substrat à différents moments. Au premier contact de la gouttelette avec le substrat la pression augmente jusqu'à une valeur de 190 MPa aux extrémités et 150 MPa au centre de la gouttelette à 0.005 μ s, puis elle diminue rapidement. A 0.1 μ s la pression devient uniforme le long de la surface et elle continue à diminuer pour atteindre la pression ambiante. Cette forte pression, générée au début de l'impact de la gouttelette, joue un rôle important en termes d'adhérence avec le substrat. En effet, en projection plasma les lamelles adhèrent au substrat essentiellement par un mécanisme d'accrochage mécanique aux aspérités de la surface du substrat.

III.1.2 Champs de vitesse

Juste après l'impact, la gouttelette s'étale radialement pour former une lamelle. En raison de la vitesse élevée de la gouttelette, la force d'inertie est beaucoup plus importante que la force de tension superficielle au début de l'étalement. La distribution de la vitesse dans la gouttelette et dans l'air ainsi que les lignes de courant sont illustrées dans la figure III.4. L'augmentation de la pression juste après l'impact a pour conséquence l'accélération du fluide circulant le long du substrat avec une grande vitesse dans la direction radiale. A 0.01 μ s la vitesse de l'écoulement au centre de la gouttelette diminue rapidement sous l'effet de la paroi, par contre aux extrémités de la gouttelette la vitesse augmente jusqu'à 360 m/s, ce qui représente plus de trois fois la vitesse initiale de l'impact (100 m/s), cette valeur est très cohérente avec celle rapportée par Li et al [104]. La vitesse dans la partie supérieure de la gouttelette est pratiquement égale à la vitesse initiale d'impact.

Juste après l'impact (de 0.01 à 0.05 μ s), les lignes de courants se dirigent dans la direction verticale descendante à l'intérieur de la gouttelette. Cependant, dans l'air environnant, les lignes de courants à proximité du substrat sont le long de la direction radiale vers l'extérieur. Au fur et à mesure que la gouttelette s'étale, elle induit l'air, initialement au repos, en mouvement, formant deux tourbillons primaires au-dessus du substrat. Cela signifie que l'air est chassé pendant que la gouttelette s'étale. La vitesse de l'écoulement diminue progressivement avec le temps, à 0.3 μ s la vitesse maximale diminue jusqu'à environ 100

Chapitre III : Résultats et discussions

m/s et à $0.5 \mu\text{s}$, elle est égale presque à 60 m/s . le maximum de vitesse est toujours aux extrémités de la gouttelette. A cet instant (de 0.3 à $0.5 \mu\text{s}$) les lignes de courant dans la gouttelette sont dans la direction radiale, la direction de l'étalement de la gouttelette.

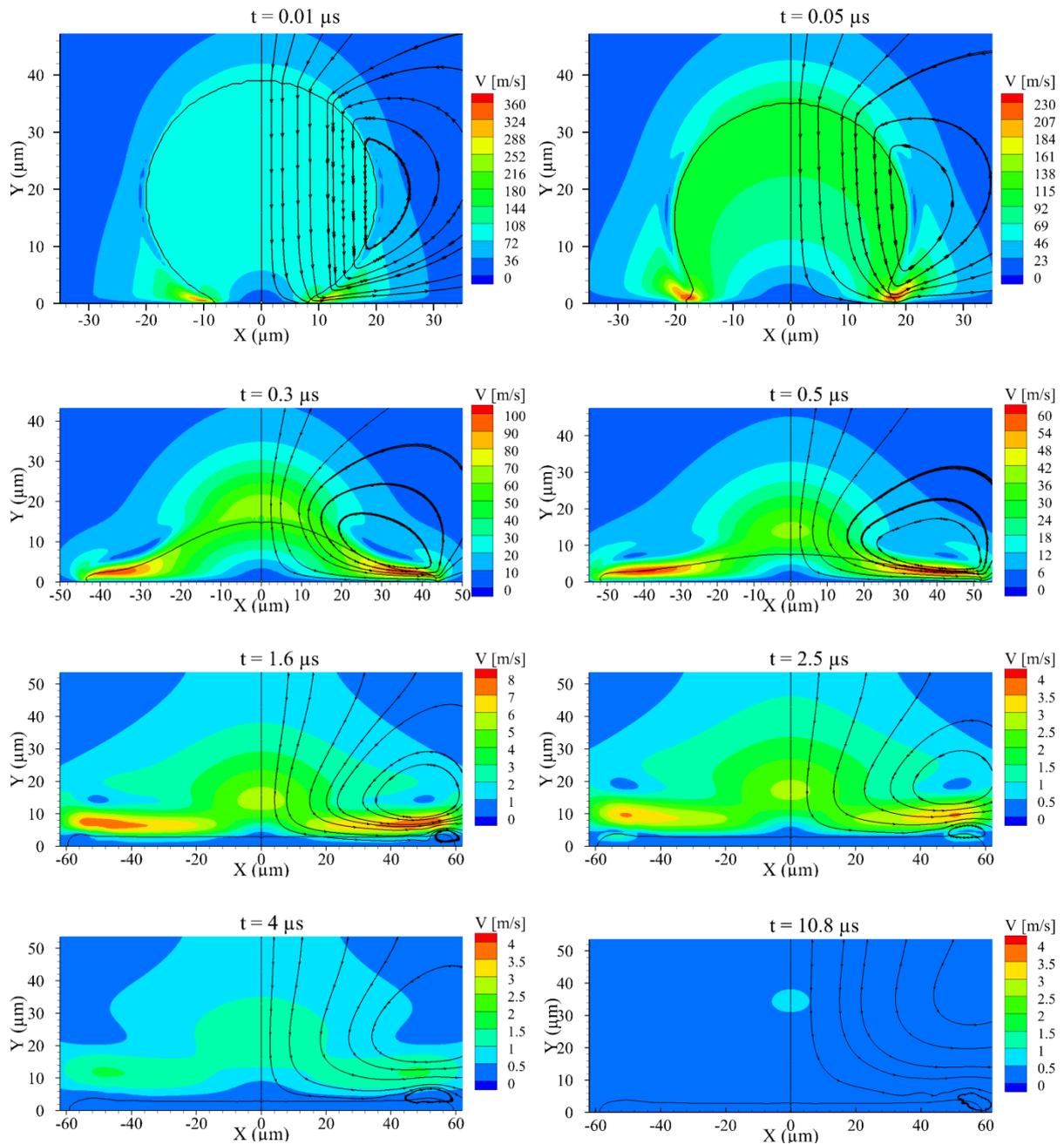


Figure III.4 Champs de vitesse et les lignes de courant dans la gouttelette et dans l'air lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40 \mu\text{m}$ de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K .

Chapitre III : Résultats et discussions

La gouttelette atteint son étalement maximal à $1.6 \mu\text{s}$, à cet instant la vitesse dans la gouttelette est presque nulle, par conséquent la force d'inertie de la gouttelette diminue considérablement. A ce moment la tension superficielle force la gouttelette à reculer légèrement dans la partie supérieure à l'extrémité de la gouttelette, d'où l'apparition d'une nouvelle zone de recirculation contrarotative au tourbillon primaire. Cette zone de recirculation apparaît seulement dans la partie supérieure à cause de la solidification de la gouttelette dans la partie adjacente au substrat. A $4 \mu\text{s}$ de l'impact la vitesse est pratiquement nulle dans toute la lamelle (gouttelette complètement étalée), pareille pour ce qui est de l'air environnant et le tourbillon principal commence à s'éloigner de la lamelle vers l'extérieur. A $10.8 \mu\text{s}$ la lamelle est entièrement solidifiée, la vitesse est nulle dans toute la région proche de la lamelle et le tourbillon principal s'est déplacé vers l'extérieur loin de la lamelle. Après la solidification, la lamelle a une forme de disque régulier d'un diamètre de $119.2 \mu\text{m}$, aplati avec les bords légèrement surélevés, ceci est lié à l'accumulation de masse sous l'effet des forces de tensions superficielles.

III.1.3. Champs de température

Lorsqu'une gouttelette fondue à haute température heurte un substrat solide initialement à une température moins élevée, la chaleur est transférée de la gouttelette vers le substrat en raison du gradient de température très élevé entre les deux. La figure III.5 représente l'étalement de la gouttelette sur le substrat, ainsi que la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat. A cause de la grande différence de température entre la gouttelette et le substrat, un transfert de chaleur important se produit de la gouttelette vers le substrat, juste après l'impact de la gouttelette. Cependant, la température de la gouttelette diminue, pour se refroidir et la température du substrat augmente, et d'une manière importante à l'interface entre la gouttelette et le substrat. D'après la figure, l'étalement de la gouttelette est plus rapide que son refroidissement. A $1.6 \mu\text{s}$ la gouttelette atteint son étalement maximal, alors que la température dans sa partie supérieure est toujours proche de sa température initiale (2800 K). Le refroidissement de la lamelle jusqu'à une température inférieure à sa température de fusion est au bout de $10.8 \mu\text{s}$. A l'interface gouttelette/substrat la température augmente rapidement pour atteindre une valeur maximale proche de 1500 K . Cette température est inférieure à la température de fusion de l'acier 304L (environ 1700 K), et par conséquent la fusion du substrat n'est pas observée. Au bout de $10.8 \mu\text{s}$, la température est toujours proche de température initiale (450 K) en-

Chapitre III : Résultats et discussions

dessous de $16.5 \mu\text{m}$ de la surface du substrat. Cela est dû à la faible conductivité thermique de l'acier 304L.

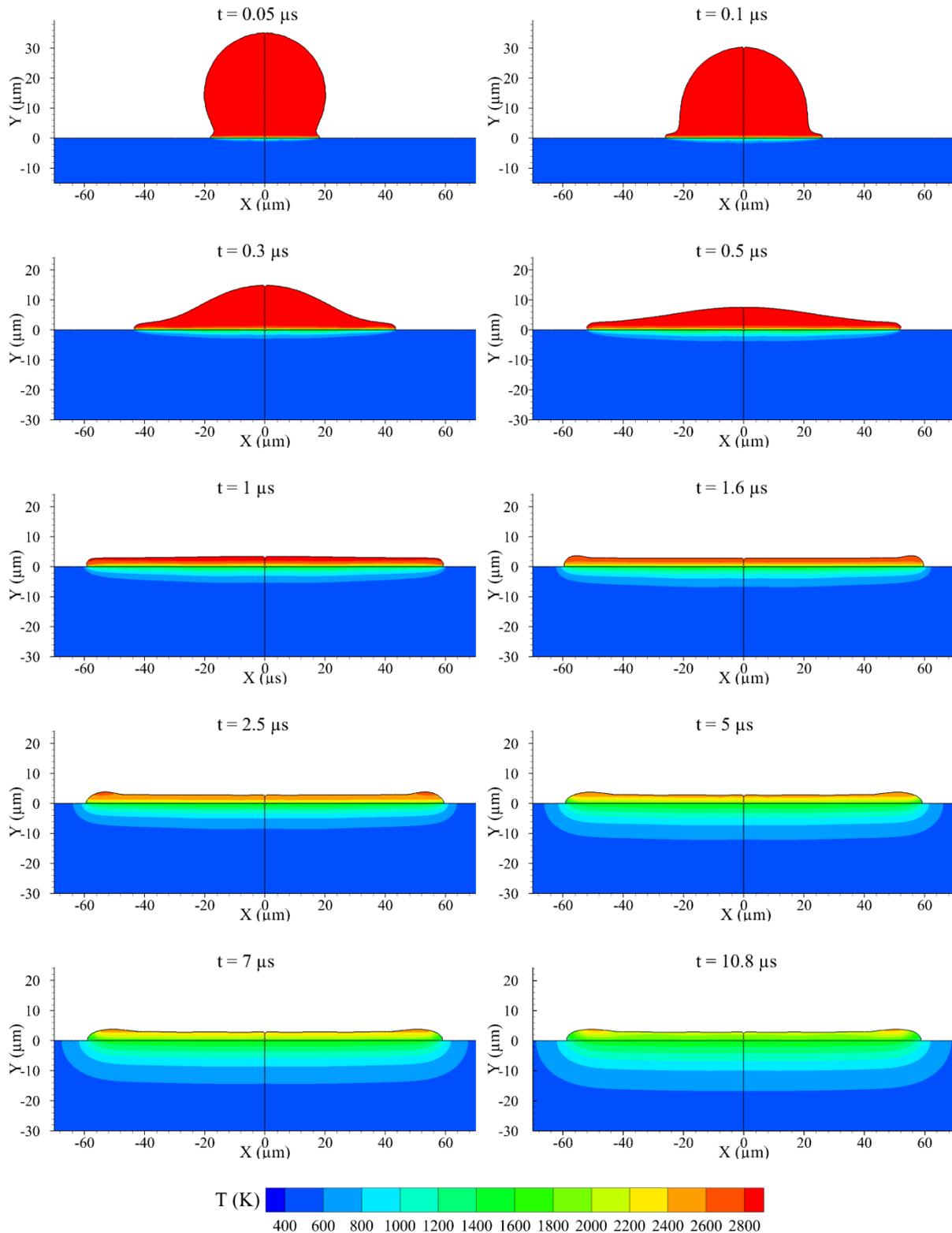


Figure III.5 Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40 \mu\text{m}$ de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K .

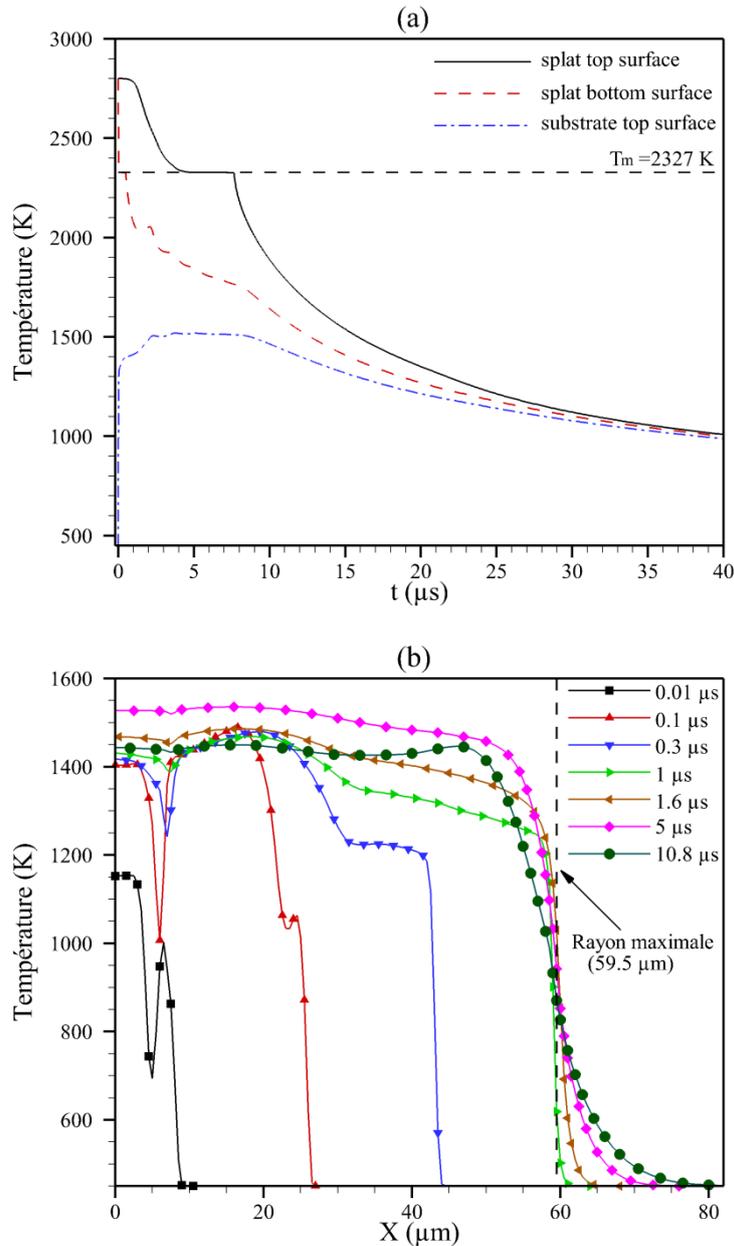


Figure III.6 Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat (a), répartition de la température le long de la surface du substrat à différents moments (b).

La figure III.6a illustre l'historique de la température en trois emplacements au centre de la gouttelette, à la surface supérieure et à la surface inférieure de la gouttelette étalée, ainsi qu'à la surface supérieure du substrat. Pendant l'étalement de chaque gouttelette, un transfert de chaleur de la gouttelette vers le substrat se produit. La température de la surface inférieure de la gouttelette diminue rapidement pour atteindre une valeur inférieure à la température de fusion, et la solidification commence pratiquement à $0.2 \mu\text{s}$. A ce moment la température de la surface supérieure du substrat augmente, pour atteindre une température proche de 1400 K,

Chapitre III : Résultats et discussions

tandis que la température de la surface supérieure de la gouttelette est toujours égale température initiale (2800 K) jusqu'à 0.5 μs . Puis la température diminue rapidement jusqu'à la température de la fusion, pour qu'une solidification en palier commence à 4.5 μs et elle s'achève à 7.6 μs , pour une durée de 3.1 μs , cela est dû au dégagement de la chaleur latente. La solidification est suivie par une phase de refroidissement très rapide, pour atteindre une température d'équilibre pour les trois endroits, qui est proche de 1000 K. La température de la surface supérieure du substrat augmente pour atteindre une valeur maximale de 1525 K, cette valeur est maintenue pendant 4.2 μs entre 3.4 μs et 7.6 μs , à cause du dégagement de la chaleur latente provenant de la gouttelette lors de sa solidification. Après que la surface supérieure de la gouttelette est solidifiée complètement, la température de la surface supérieure du substrat commence à baisser, c'est le début de refroidissement de la surface du substrat en transférant la chaleur vers la profondeur pour atteindre la température d'équilibre.

La surface du substrat est l'endroit le plus sollicité par le transfert de la chaleur de la gouttelette vers le substrat. La figure III.6b représente la distribution de la température le long de la surface du substrat à différents moments. Juste après l'impact de la gouttelette, à 0.01 μs , la température de la surface du substrat augmente de 450 K (température initiale) jusqu'à 1150 K, puis elle chute brusquement jusqu'à 700K en raison de la présence d'air emprisonné dans la gouttelette (figure III.7). Cela altère le transfert de chaleur en raison de la faible conductivité thermique de l'air, donc la chaleur est transférée de la gouttelette au substrat à une faible vitesse. Au fur et à mesure que la gouttelette s'étale, la température de la surface augmente, à 0.1 μs la température est de 1400 K à la surface proche du centre, et elle rechute toujours à cause de l'air emprisonné dans la gouttelette. Par contre la température dans cette zone augmente en raison du temps écoulé. Puis la température augmente dans la zone où la surface est occupée par la gouttelette et l'absence d'air. A $t=1 \mu\text{s}$, la distribution de la température est presque uniforme dans les 25 μm proche du centre de la gouttelette, puis la température diminue légèrement aux extrémités. Cela est dû au temps d'occupation de la surface du substrat par la gouttelette au cours de l'étalement. La surface du substrat atteint la température maximale à partir de 3.4 μs de l'impact de la gouttelette, comme a été déjà expliqué sur la figure III.6a. A 5 μs , la distribution de la température est pratiquement uniforme sur la surface du substrat et elle est très proche de la valeur maximale (1525). Cette valeur est inférieure de la température de fusion de l'acier 304L (1700 K), d'où l'absence de fusion le long de la surface du substrat. Après un certain temps (à 7.6 μs), le transfert de chaleur vers le substrat diminue, et ce dernier commence à se refroidir. La lamelle solidifie

Chapitre III : Résultats et discussions

complètement à $10.8 \mu\text{s}$ (figure III.8), à cette instant la température de la surface diminue jusqu'à 1450 K . La surface du substrat occupée par la lamelle correspond à un rayon maximal d'étalement de $59.5 \mu\text{m}$, mais le transfert de chaleur a affecté la surface adjacente dans la direction radiale, comme il peut être remarqué sur la figure III.5 et la figure III.6b.

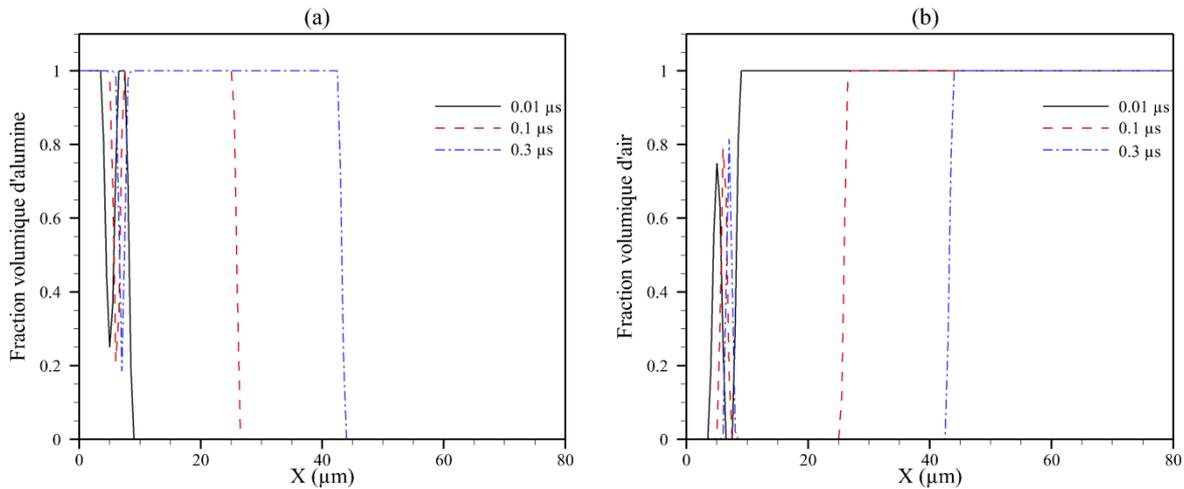


Figure III.7 Distribution de la fraction volumique (a) de l'alumine (b) de l'air le long de la surface du substrat à différents instants.

Lorsqu'une gouttelette heurte une surface solide, l'air est généralement emprisonné en dessous. Quand une gouttelette s'approche d'une surface solide, l'air en dessous est incapable de s'échapper et la pression résultante dans l'air est suffisante pour déformer la gouttelette, emprisonnant finalement une mince couche d'air quand la gouttelette entre en contact avec la surface [85]. La figure III.7 illustre la distribution de la fraction volumique (a) de l'alumine (b) de l'air le long de la surface du substrat à différents moments. Juste après l'impact de la gouttelette, à $0.01 \mu\text{s}$ la fraction volumique de l'alumine sur la surface du substrat, près du centre de la gouttelette est presque nulle (0.25), alors que celle de l'air est proche de l'unité (0.75). Cela signifie qu'à cet endroit l'air est emprisonné dans la gouttelette. Cette quantité d'air se déplace légèrement dans la direction radiale lors de l'étalement de la gouttelette. Cependant, l'air emprisonné affecte le transfert de chaleur de la gouttelette au substrat, comme a été déjà discuté dans la figure III.6b.

III.1.4. La solidification

La figure III.8 montre la solidification de la gouttelette lors de son étalement sur le substrat. Comme a été déjà expliqué sur la figure III.6a, la température de la gouttelette au point de contact diminue rapidement pour atteindre une valeur inférieure à la température de fusion, d'où le début de la solidification à $0.2 \mu\text{s}$. Sur la figure III.9, la fraction liquide de l'alumine est présentée le long de la surface du substrat ainsi que le front de solidification (représenté en bleu pour une fraction liquide égale à 0.5). A $0.05 \mu\text{s}$ de l'impact de la gouttelette, la fraction liquide est proche de l'unité, donc la solidification n'est pas encore commencée. Par contre à $0.2 \mu\text{s}$ la fraction liquide diminue au-dessous de 0.5 aux deux endroits, le premier proche du centre et le deuxième vers l'extrémité de la gouttelette, d'où le début de la solidification de la gouttelette près du substrat. Au fur et à mesure que la gouttelette s'étale, la solidification progresse. A $0.3 \mu\text{s}$, la partie adjacente au substrat jusqu'à $19.5 \mu\text{m}$ dans la direction radiale est solidifiée, ainsi que la partie comprise entre $28.5 \mu\text{m}$ et $37.5 \mu\text{m}$, le reste est toujours fondue. Cela peut être expliqué par le fait que la partie proche du centre est la première partie entrant en contact avec le substrat froid, concernant deuxième partie, la cause est due à la faible épaisseur de la gouttelette en contact avec le substrat.

A l'instant $0.5 \mu\text{s}$ et $1 \mu\text{s}$, la gouttelette à l'interface gouttelette/substrat est pratiquement solidifiée sauf les bords. A cet instant la gouttelette est toujours en état d'étalement, d'où il faut noter que la solidification de la gouttelette commence bien avant qu'elle soit complètement étaler. A $1.6 \mu\text{s}$, la gouttelette atteint son étalement maximum, à ce moment il est bien observé que la solidification progresse le long des bords, ce qui empêche l'étalement de la gouttelette. Cependant, la partie supérieure de la gouttelette est toujours fondue au-dessus de la couche solide, sous l'effet de tension superficielle cette partie fondue recule légèrement vers le centre pour former une petite bosse. La solidification continue à progresser vers la partie supérieure de la gouttelette, à $7 \mu\text{s}$ (figure III.8), la solidification est presque terminée, sauf aux bords, car l'épaisseur de la gouttelette est importante à cet endroit. La gouttelette est complètement solidifiée à $10.8 \mu\text{s}$. il faut mentionner que le temps de solidification de la gouttelette est beaucoup plus important que le temps de son étalement.

Chapitre III : Résultats et discussions

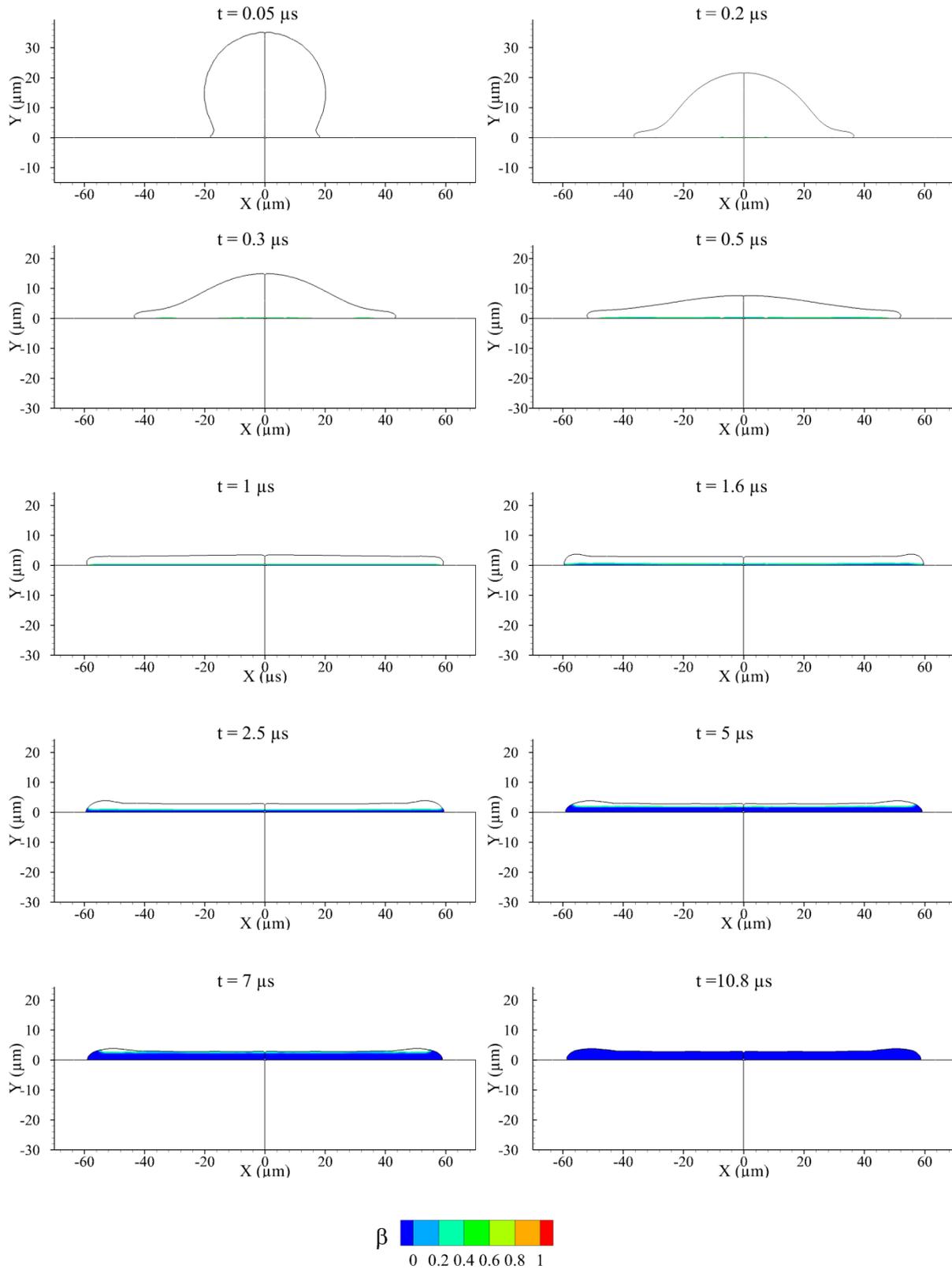


Figure III.8 Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.

Chapitre III : Résultats et discussions

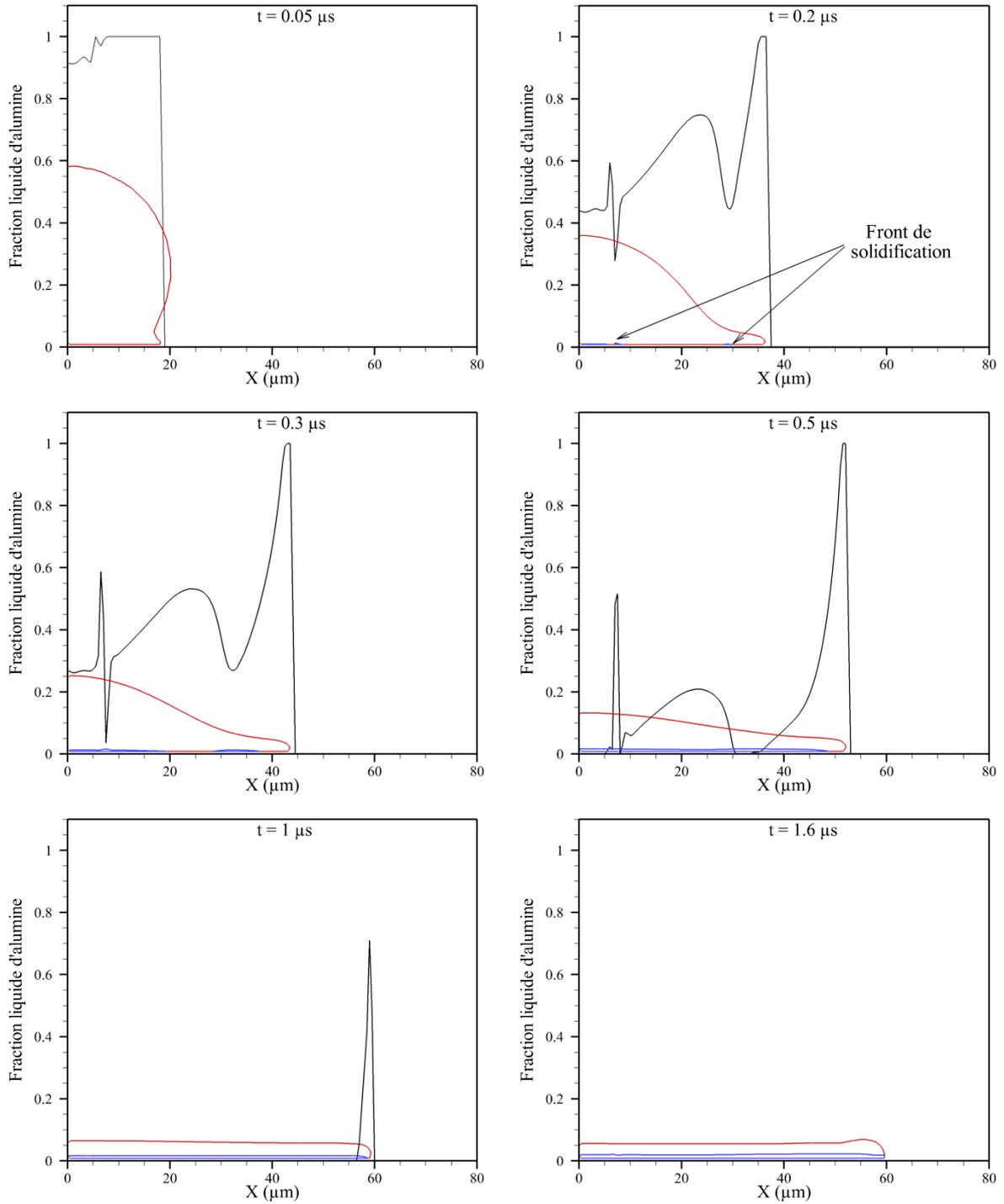


Figure III.9 Fraction liquide de l'alumine le long de la surface du substrat lors de l'étalement de la gouttelette.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1.5. Le degré d'étalement

Le degré d'étalement est le rapport entre le diamètre de la gouttelette pendant son étalement (D) et son diamètre initial (D_0), ($\xi = D/D_0$), est un paramètre important dans le processus d'étalement des gouttelettes, sachant que la qualité du contact entre les couches est fortement liée à l'étendue de la gouttelette étalée. Ce paramètre est généralement exprimé en fonction du nombre de Reynolds par l'expression suivante :

$$\xi_{max} = aRe^b \quad III.1$$

Cette expression peut également contenir le nombre de Weber, mais dans le procédé de projection au plasma, l'effet du nombre de Weber peut être considéré comme insignifiant en raison de l'effet des forces d'inertie qui est plus important que celui de la tension superficielle. Les paramètres a et b sont des grandeurs établies analytiquement pour le cas de Madejski [27] et résultent de simulations numériques pour les autres. Les valeurs obtenues par chaque auteur sont données dans le tableau III.2.

Tableau III.2 Paramètres a et b pour exprimer le degré d'étalement maximal en fonction du nombre de Reynolds ($Re = 390$)

ξ_{max}	a	b	Référence
4.25	1.290	0.200	Madejski [27]
3.14	0.43	1/3	Shinoda et al [105]
3.05	0.925	0.200	Wei et al [106]
2.59	1.208	0.128	Zhang et al [84]
2.98	0.904	0.200	Simulation (figure III.10)

Les degrés d'étalement obtenus analytiquement en appliquant l'équation 3.1 vont de la valeur 2,59 pour l'expression de Zhang et al [84] et jusqu'à 4,25 pour la relation de Madejski [27]. Le degré d'étalement final obtenu par notre simulation ($\xi_{max}=2,98$) est du même ordre de grandeur que ces références. En fixant la valeur du coefficient b égale à celle obtenue par l'approche analytique de Madejski [27] ($b = 0,200$), le coefficient a obtenu par notre simulation vaut 0.904 ce qui est dans la même gamme que les valeurs de la littérature.

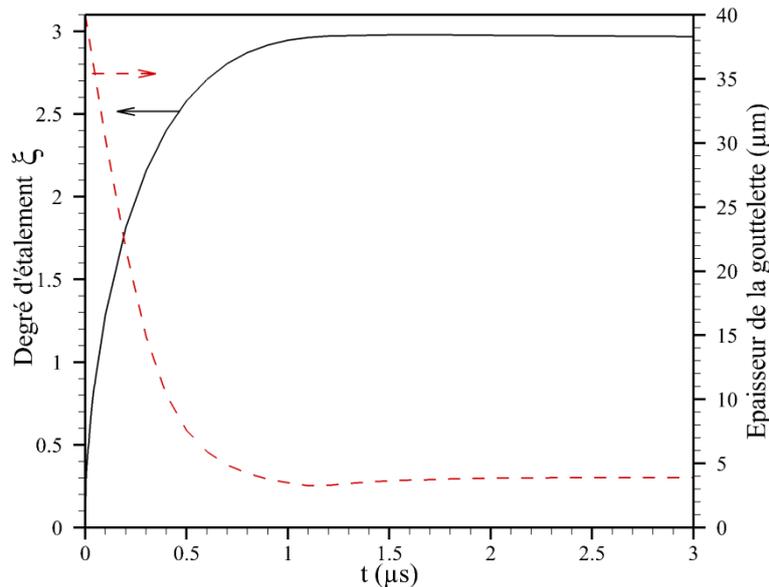


Figure III.10 Evolution temporelle du degré d'étalement de la gouttelette ainsi que son épaisseur.

La figure III.10 montre la variation temporelle du degré d'étalement de la gouttelette et de son épaisseur lors de son étalement sur le substrat. Juste après l'impact ($t < 0.3 \mu\text{s}$), la gouttelette est entièrement liquide et heurte le substrat avec une grande vitesse, d'où un étalement rapide dans ces premiers instant. Entre $0.3 \mu\text{s}$ et $1 \mu\text{s}$, l'étalement devient lent et la pente est plus faible. Ce ralentissement est dû à deux phénomènes : la diminution de l'énergie cinétique de la gouttelette et la solidification de la lamelle au contact avec le substrat qui débute. A partir de $1.6 \mu\text{s}$, la courbe tend vers une valeur asymptotique. La partie inférieure de la lamelle est solidifiée (figure III.8) ce qui amortit l'étalement. La gouttelette atteint à cet instant son étalement maximal, le degré d'étalement atteint une valeur maximale de 2.98 ($\xi_{max} = 2.98$), qui correspond à diamètre maximal de $119.2 \mu\text{m}$ et une épaisseur maximale de $3.87 \mu\text{m}$.

III.2. Effet des paramètres des gouttelettes à l'impact

La morphologie des lamelles, qui conditionne les propriétés du dépôt, dépend à la fois des paramètres des particules à l'impact : taille, vitesse, température, état de fusion et état chimique et des paramètres du substrat : nature, état de surface, température. Les paramètres des particules sont eux-mêmes conditionnés par les caractéristiques de l'écoulement plasma (champs de vitesse, température, composition) et ses propriétés thermo-physiques (enthalpie, conductivité thermique et viscosité) et, les conditions d'injection du matériau dans cet écoulement. Une étude paramétrique a été réalisée pour examiner l'effet de la vitesse initiale

Chapitre III : Résultats et discussions

d'impact, la température initiale de la gouttelette, ainsi que la température initiale du substrat sur la formation du dépôt.

III.2.1. Effet de la vitesse d'impact

Pour étudier l'effet de la vitesse initiale d'impact sur l'étalement et la solidification de la gouttelette, quatre valeurs sont considérées: 50 m/s, 100 m/s, 150 m/s et 200 m/s. La température et le diamètre initiaux de la gouttelette sont 2800 K et 40 μm respectivement. Le substrat est préchauffé à 450 K, l'interface entre la gouttelette et le substrat est représenté par une résistance thermique de contact de $10^{-7} \text{m}^2 \text{K/W}$. La figure III.11 montre l'étalement de la gouttelette ainsi que la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat. La partie gauche de chaque image représente le résultat d'impact d'une gouttelette avec une vitesse initiale de 50 m/s et la partie droite avec une vitesse de 150 m/s. Les deux gouttelettes commencent à s'étaler juste après l'impact sous l'effet de la force d'inertie. La gouttelette initialement à 150 m/s à l'impact s'étale plus rapidement, elle atteint son étalement maximal à 1.1 μs , contrairement à la gouttelette qui est initialement à 50 m/s à l'impact, son étalement est plus lent, elle atteint son diamètre maximale qu'après 2.2 μs , cette durée est le double de la durée pour laquelle la gouttelette initialement à 150 m/s atteint son diamètre maximale.

Il est très claire que le phénomène de recule de la partie supérieure de la gouttelette à son extrémité est très important, pour la gouttelette initialement à 50 m/s. Cela est dû au fait que cette partie est toujours à l'état liquide d'une part et que la force d'inertie se dissipe plus rapidement en raison de la faible vitesse initiale d'autre part, ce qui favorise considérablement le recule de cette partie sous l'effet de la tension superficielle. Pour la gouttelette initialement à 150 m/s, le phénomène de recule est faible à cause de la force d'inertie plus importante et la solidification rapide de la gouttelette (figure III.13). Après l'étalement et la solidification, les deux lamelles ont une forme de disque régulier aplati avec les bords légèrement surélevés, d'un diamètre de 101.7 μm et d'une épaisseur de 5.4 μm pour la gouttelette initialement à 50 m/s et d'un diamètre de 131.4 μm et d'une épaisseur de 3 μm pour la gouttelette initialement à 150 m/s.

Sur la figure III.11 est représentée aussi la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat. A cause de la grande différence de température entre les

Chapitre III : Résultats et discussions

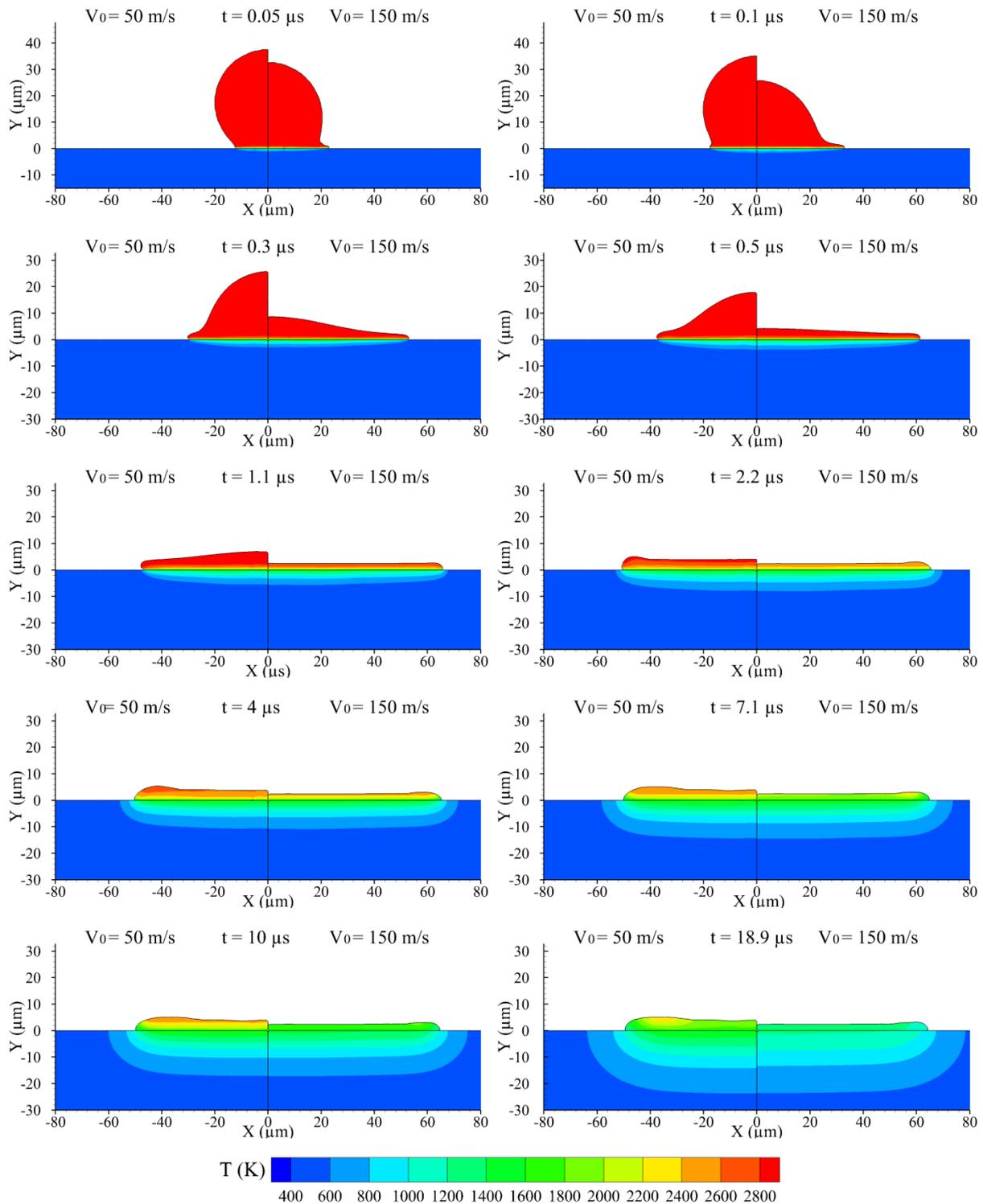


Figure III.11 Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse d'impact de 50 m/s et 150 m/s sur un substrat en acier inoxydable à 450 K.

gouttelettes et le substrat, un transfert de chaleur important se produit des gouttelettes vers le substrat, juste après l'impact. La gouttelette initialement à 150 m/s, se refroidit plus

Chapitre III : Résultats et discussions

rapidement à cause de sa faible épaisseur, après un étalement et aplatissement rapides et important, car la gouttelette atteint une épaisseur de $3 \mu\text{m}$ au bout de $1.1 \mu\text{s}$. A cet instant la partie supérieure de la lamelle est proche de la température initiale (2800 K), alors que la partie inférieure proche du substrat est au-dessous de la température de fusion (2327 K). A $2.2 \mu\text{s}$ la température dans toute cette lamelle est inférieure à la température initiale (2800 K). Par contre, à cet instant, dans la gouttelette initialement à 50 m/s , la température dans la partie supérieure est toujours proche de la température initiale (2800 K), cela est dû à sa grande épaisseur ($5.4 \mu\text{m}$), après un étalement et aplatissement lent et faible. Pour cette lamelle le transfert de chaleur vers le substrat, est plus important vers la profondeur que la direction radiale. Contrairement à la gouttelette initialement à 150 m/s , le transfert est plus important dans la direction radiale que la profondeur du substrat, à cause de son grand diamètre final et sa faible épaisseur.

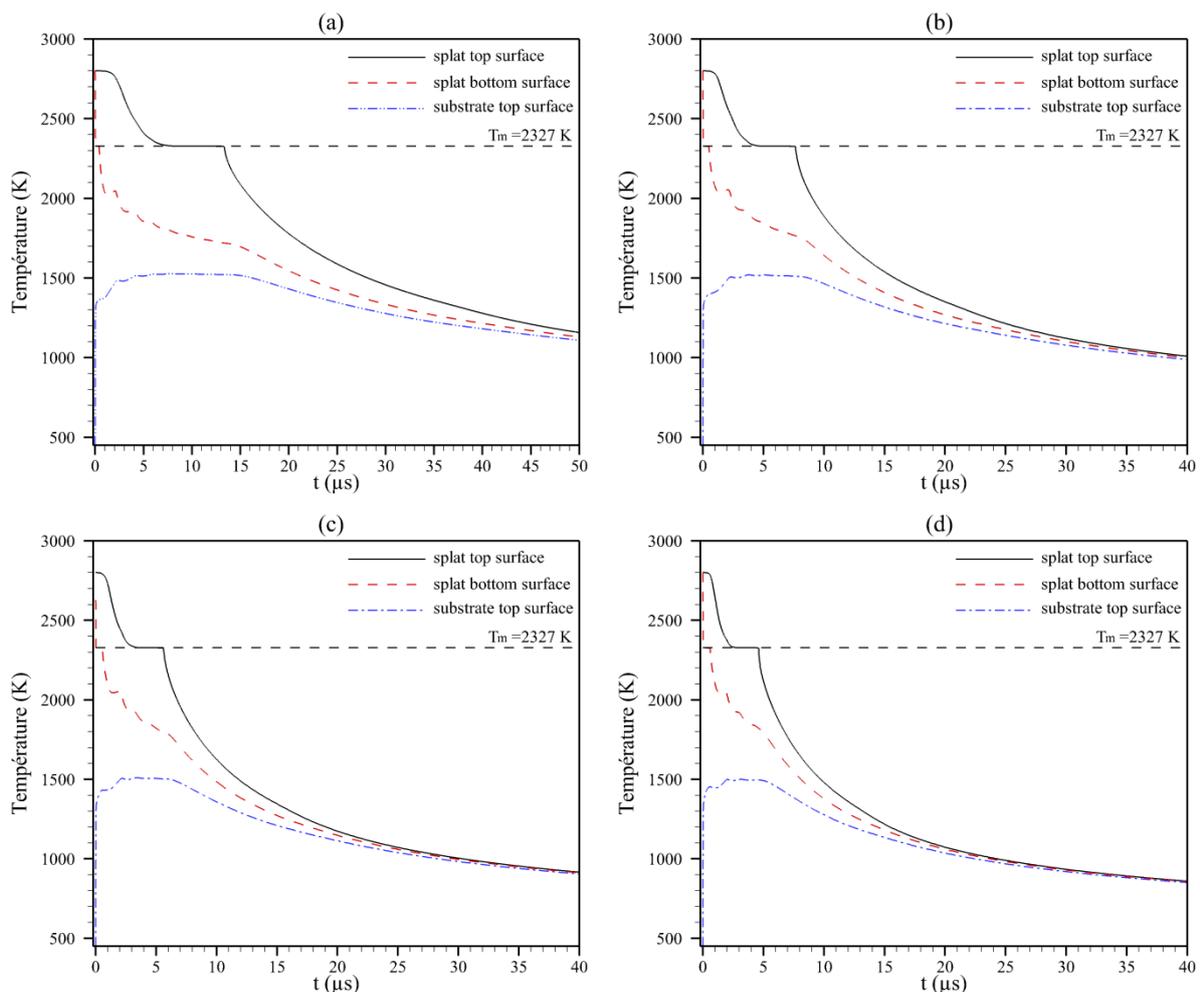


Figure III.12 Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat pour différentes vitesses initiales (a) $V_0=50 \text{ m/s}$, (b) $V_0=100 \text{ m/s}$, (c) $V_0=150 \text{ m/s}$, (d) $V_0=200 \text{ m/s}$.

Chapitre III : Résultats et discussions

La figure III.12 illustre l'historique de la température au centre de la gouttelette en trois points, la surface inférieure et supérieure de la lamelle, ainsi que la surface supérieure du substrat, pour les différentes vitesses initiales. La figure montre, que pour des vitesses élevées d'impact de la gouttelette sur le substrat, la vitesse de refroidissement des lamelles est très importante et la durée d'échauffement du substrat est faible. Sur la figure III.12a, qui correspond à une vitesse d'impact de 50 m/s, le refroidissement de la gouttelette est très lent. La surface de la lamelle atteint une température au-dessous du point de fusion (2327 K), après la solidification en palier à 13.3 μ s. par contre, pour la gouttelette initialement à 200 m/s (figure III.12d) le refroidissement de la lamelle est rapide, car la surface atteint une température inférieure au point de fusion après 4.6 μ s, puis elle subit un refroidissement très rapide pour atteindre une température de 860 K au bout de 40 μ s, ce qui correspond un taux de refroidissement de 4.85×10^7 K/s . Alors que la gouttelette initialement à 50 m/s, après 50 μ s, la surface de la lamelle atteint 1160 K, ce qui correspond un taux de refroidissement de 3.28×10^7 K/s . Même tendance est observée concernant l'échauffement de la surface du substrat et son refroidissement. La gouttelette initialement à 50 m/s chauffe le substrat jusqu'à une température importante (1525 K) pour une longue période, car le refroidissement du substrat ne commence qu'après 14.5 μ s. contrairement à la gouttelette initialement à 200 m/s chauffe le substrat jusqu'à 1500 K pour une courte durée (4.9 μ s).

La solidification lors de l'étalement de la gouttelette est illustrée sur Figure III.13. La partie gauche de chaque image représente le résultat d'impact d'une gouttelette avec une vitesse initiale de 50 m/s et la partie droite avec une vitesse de 150 m/s. En raison du refroidissement rapide de la surface inférieure des deux gouttelettes, la solidification de cette partie commence juste après l'impact, à 0.3 μ s une couche fine de solide est observée. La solidification progresse avant que les deux gouttelettes soient complètement étalées. Après l'étalement maximal, à 1.1 μ s pour la gouttelette initialement à 150 m/s et 2.2 μ s pour la gouttelette initialement à 50 m/s, la deuxième lamelle possède un grand diamètre et une faible épaisseur (131.4 μ m et 3 μ m). Ce qui favorise une solidification rapide, cette lamelle est complètement solidifiée à 7.1 μ s, à cet instant la gouttelette initialement à 50 m/s est à moitié solidifiée. Elle atteint sa solidification totale à 18.9 μ s, ce qui représente plus que le double de la durée de solidification de la gouttelette initialement à 150 m/s.

Chapitre III : Résultats et discussions

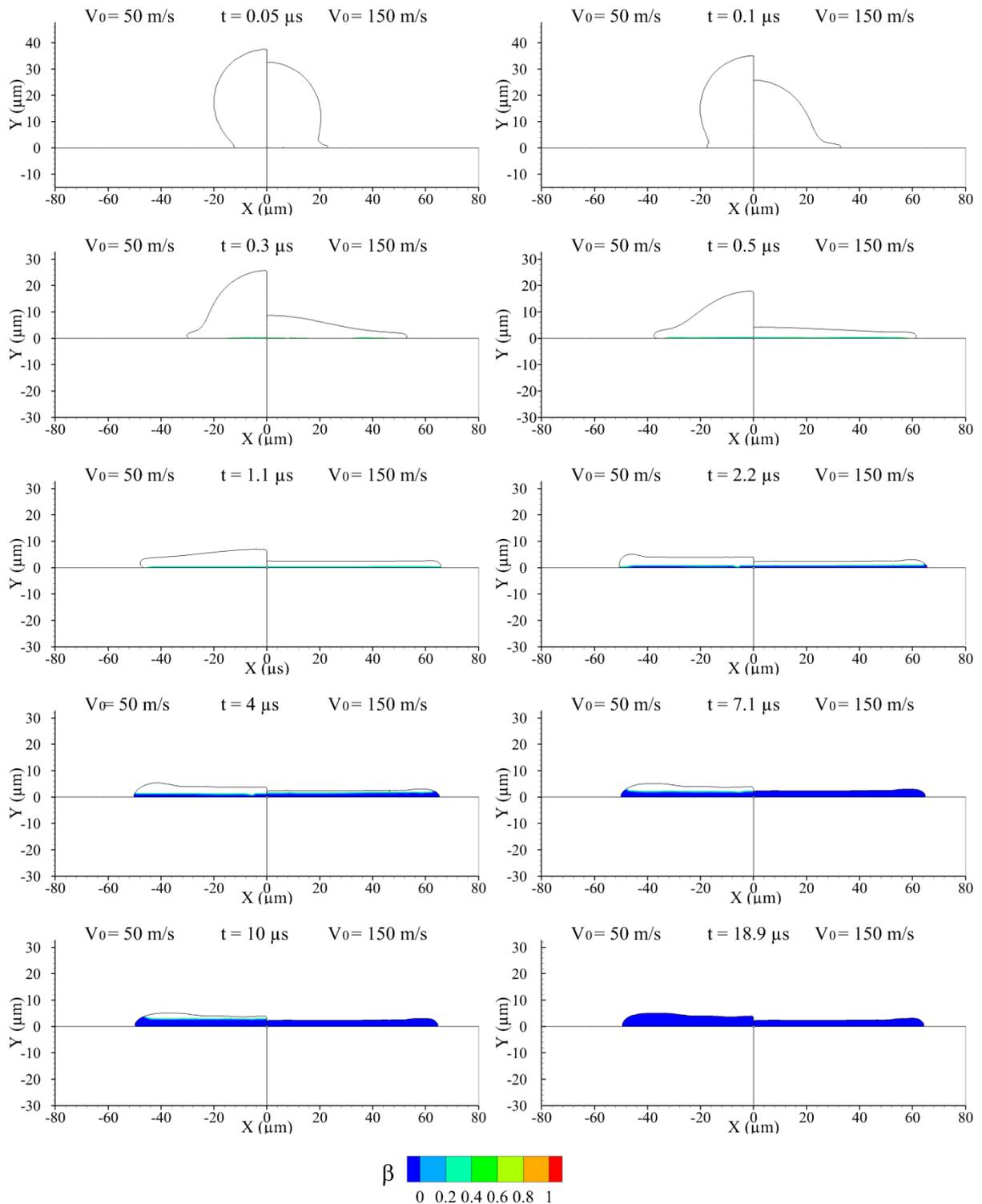


Figure III.13 Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 50 m/s et 150 m/s sur le substrat en acier inoxydable à 450 K.

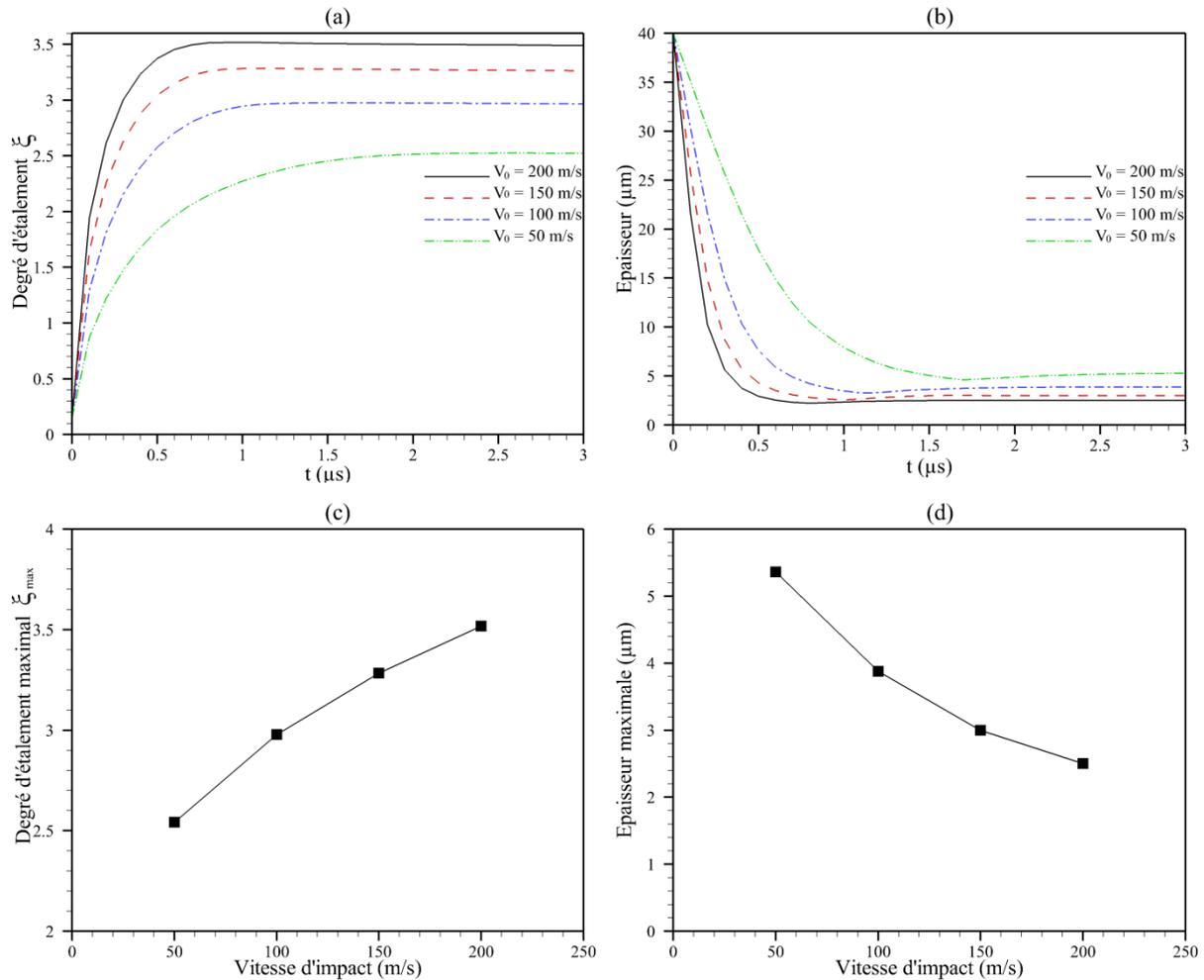


Figure III.14 (a) Evolution temporelle du degré d'étalement pour différentes vitesses d'impact, (b) évolution temporelle de l'épaisseur de la gouttelette pour différentes vitesses, (c) variation du degré d'étalement maximale en fonction de la vitesse d'impact, (d) variation de l'épaisseur maximale en fonction de la vitesse d'impact.

L'effet de la vitesse d'impact sur la morphologie de la lamelle est illustré par la figure III.14. Cette morphologie est représentée par le degré d'étalement et l'épaisseur de la lamelle. Sur la figure III.14a, un effet considérable de la vitesse d'impact sur l'étalement de la gouttelette est observé. Plus la vitesse est élevée, plus l'étalement de la gouttelette est important et rapide. Pour une vitesse d'impact de 50 m/s, la gouttelette atteint un degré d'étalement maximal de 2.5 à 2.2 μ s, par contre, pour une vitesse de 200 m/s, la gouttelette est à son degré d'étalement maximal de 3.5 à 0.8 μ s. Un effet inverse sur l'épaisseur de la lamelle est remarqué sur la figure III.14b. Plus la vitesse est grande, plus l'aplatissement de la gouttelette est important et rapide, d'où une faible épaisseur. Pour une vitesse d'impact de 50

Chapitre III : Résultats et discussions

m/s, la gouttelette atteint une épaisseur finale de 5.36 μm , contre 2.5 pour une vitesse de 200 m/s. Sur la figure III.14c, une forte proportionnalité est claire entre le degré maximal d'étalement et la vitesse d'impact de la gouttelette. Par contre, l'épaisseur de la lamelle est inversement proportionnelle avec la vitesse, ce qui est remarqué sur la figure III.14d. En conclusion, la vitesse d'impact influe considérablement sur la solidification et la morphologie finale des lamelles.

III.2.2. Effet de la température initiale de la gouttelette

Des simulations ont été réalisées pour différentes valeurs de températures initiales de la gouttelette, pour examiner son influence sur les lamelles. Le diamètre et la vitesse de la gouttelette à l'impact sont 100 m/s et 40 μm respectivement. Le substrat est préchauffé à 450 K, l'interface entre la gouttelette et le substrat est représenté par une résistance thermique de contact de $10^{-7} \text{m}^2\text{K}/\text{W}$, quatre valeurs de la température initiale sont retenues : 2400 K, 2600 K, 2800 K et 3000 K. La figure III.15 représente la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat, ainsi que l'étalement de la gouttelette. La partie gauche de chaque image illustre le résultat pour une température initiale de 2400 K et la partie droite pour une température initiale de 3000 K. Les deux gouttelettes commencent à s'étaler juste après l'impact sous l'effet de la force d'inertie. La gouttelette initialement à 2400 K atteint son étalement maximal à 1.5 μs , alors que la gouttelette qui est initialement à 3000 K à l'impact, atteint son diamètre maximal qu'après 1.7 μs , un peu plus tard que la première. Après l'étalement et la solidification, les deux lamelles ont une forme de disque régulier aplati avec les bords légèrement surélevés. La première gouttelette (initialement à 2400 K) a un diamètre final de 117.6 μm et d'une épaisseur de 3.74 μm , la deuxième gouttelette est légèrement plus étalée et plus aplatie, car son diamètre final est de 120 μm et d'une épaisseur de 3.66 μm .

A cause de sa faible température initiale, la gouttelette initialement à 2400 K se refroidit rapidement. L'échauffement du substrat dans la direction radiale est relativement faible, en raison de la faible quantité de chaleur que contient initialement la gouttelette. A l'instant de la solidification totale de la gouttelette (8.5 μs), la température reste inchangée en-dessous de 12.5 μm de la surface du substrat. Le refroidissement de la gouttelette initialement

Chapitre III : Résultats et discussions

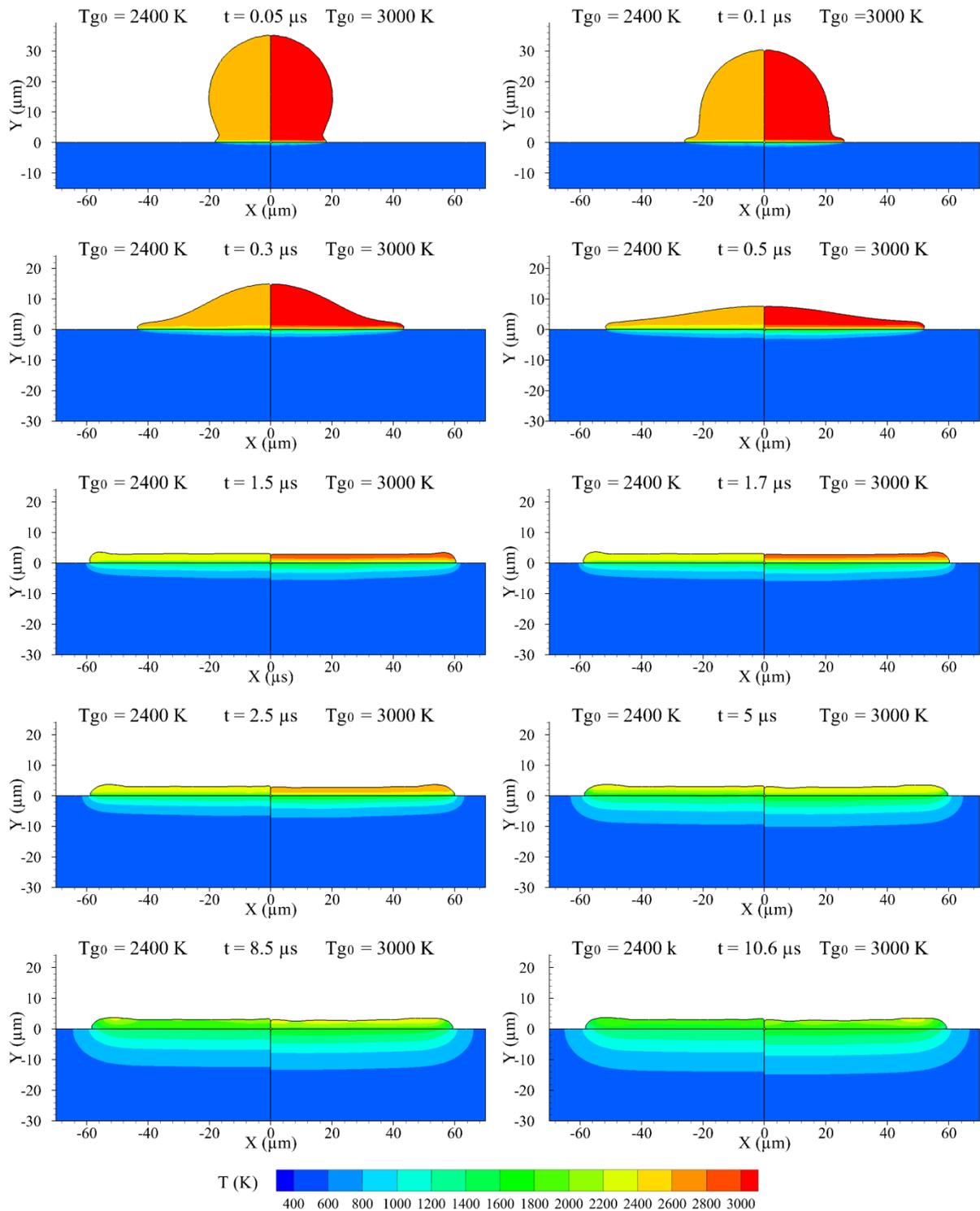


Figure III.15 Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, à 2400 K et 3000 K avec une vitesse de 100 m/s sur un substrat en acier inoxydable à 450 K .

Chapitre III : Résultats et discussions

à 3000 K est lent, compte tenu de la grande quantité de chaleur que contient initialement la gouttelette. La partie supérieure de la gouttelette est toujours à la température initiale quand elle atteint son étalement maximal ($1.7 \mu\text{s}$), ce qui a permis un étalement plus important. L'échauffement du substrat est plus important, puisqu'à l'instant de la solidification totale de la lamelle ($10.6 \mu\text{s}$), la zone qui se trouve jusqu'à $15.5 \mu\text{m}$ en-dessous de la surface est affectée par l'échauffement.

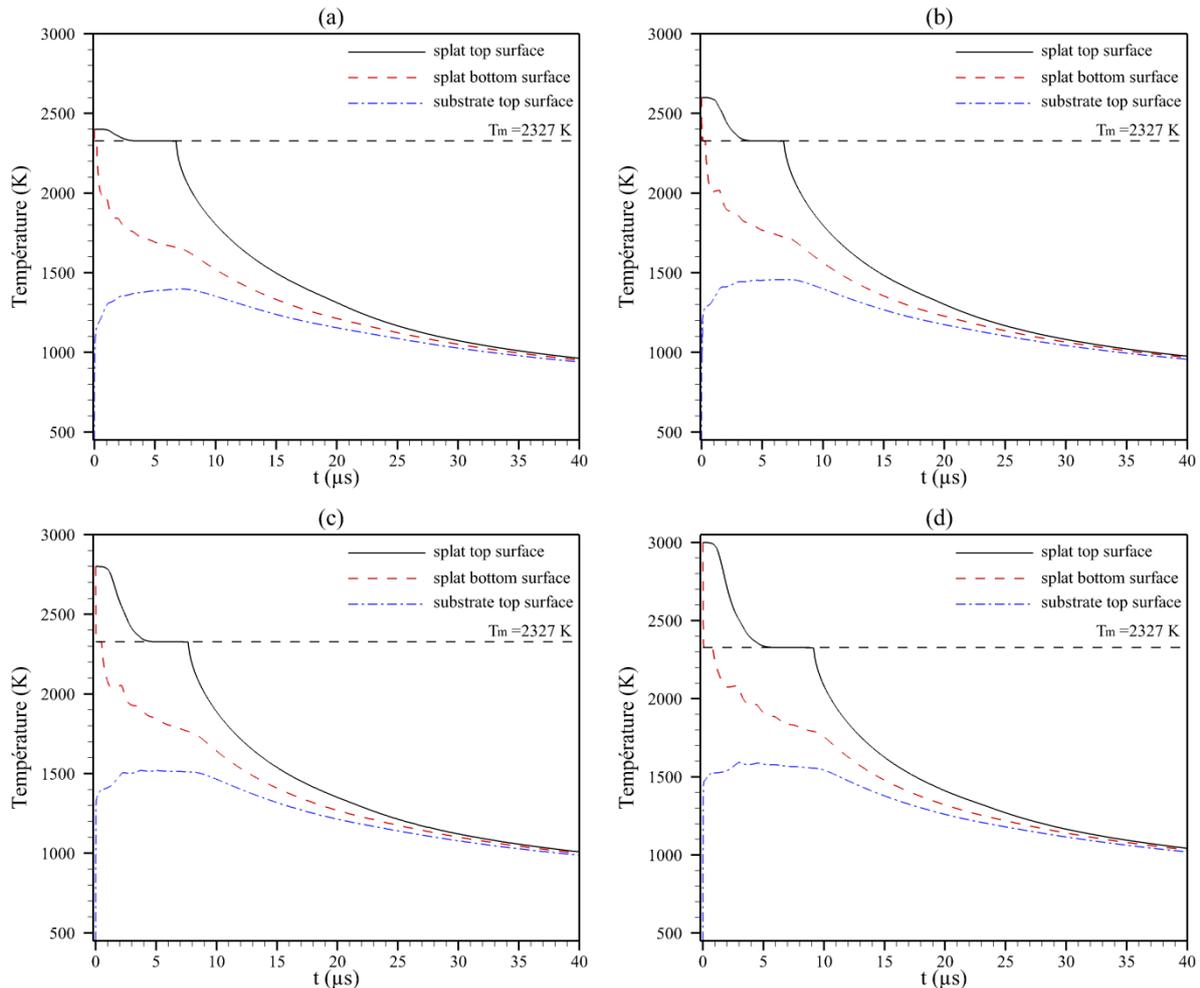


Figure III.16 Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat pour différentes températures initiales de la gouttelette (a) $T_{g_0}=2400 \text{ K}$, (b) $T_{g_0}=2600 \text{ K}$, (c) $T_{g_0}=2800 \text{ K}$, (d) $T_{g_0}=3000 \text{ K}$.

D'après la figure III.16, la vitesse de refroidissement des gouttelettes est plus importante pour des faibles températures initiales, par contre l'échauffement du substrat est plus important pour les températures élevées. La figure III.16a, qui correspond à une température initiale de 2400 K, le refroidissement de la lamelle est rapide. Après la

Chapitre III : Résultats et discussions

solidification en palier la surface de la lamelle est à une température au-dessous du point de fusion (2327 K) après 6.7 μs , alors que la gouttelette initialement à 3000 K (figure III.16d), atteint ce point qu'après 9.1 μs . Après la solidification de la surface de la lamelle, le refroidissement est plus rapide pour la gouttelette initialement à 2400 K, car elle est refroidie jusqu'à 962 K au bout de 40 μs , contrairement à la gouttelette initialement à 3000 K, elle atteint au bout de 40 μs , une température de 1042 K. la température de la surface du substrat augmente jusqu'à 1587 K pour le cas de la gouttelette initialement à 3000 K, et le refroidissement ne commence qu'après 9.4 μs . Par contre, pour le cas de la gouttelette initialement à 2400 K, la température de la surface du substrat augmente jusqu'à 1397 seulement et le refroidissement commence après 7.6 μs .

La figure III.17, montre la solidification de la gouttelette lors de son étalement. La partie gauche de chaque image représente le résultat d'impact d'une gouttelette avec une température initiale de 2400 K et la partie droite avec une température de 3000 K. En raison de sa faible température initiale (2400 K), qui est proche du point de fusion (2327 K), la solidification de la gouttelette en étalement commence juste après l'impact (0.1 μs). Contrairement à la deuxième gouttelette, sa solidification ne commence qu'après 0.5 μs . La solidification progresse rapidement dans la gouttelette initialement à 2400 K, car après 5 μs elle est presque totalement solidifiée, alors que la deuxième à cet instant est solidifiée à moitié. Le temps de la solidification d'une gouttelette initialement à une température élevée est plus important, cela est clairement observé sur la figure, pour la première lamelle la solidification s'achève après 8.5 μs , et pour la deuxième pratiquement 2 μs plus tard (10.6 μs).

L'effet de la température initiale de la gouttelette sur la morphologie de la lamelle est illustré sur la figure III.18. Un faible effet de la température initiale de la gouttelette sur le degré d'étalement est observé sur la figure III.18a. Plus la température initiale de la gouttelette est élevée, plus l'étalement de la gouttelette est légèrement important et rapide. Pour une température initiale de la gouttelette de 2400 K un degré d'étalement maximal de 2.94 est atteint à 1.5 μs . Par contre, pour une température initiale de 3000 K un degré d'étalement maximal de 3 est atteint à 1.7 μs . une très légère influence de la température

Chapitre III : Résultats et discussions

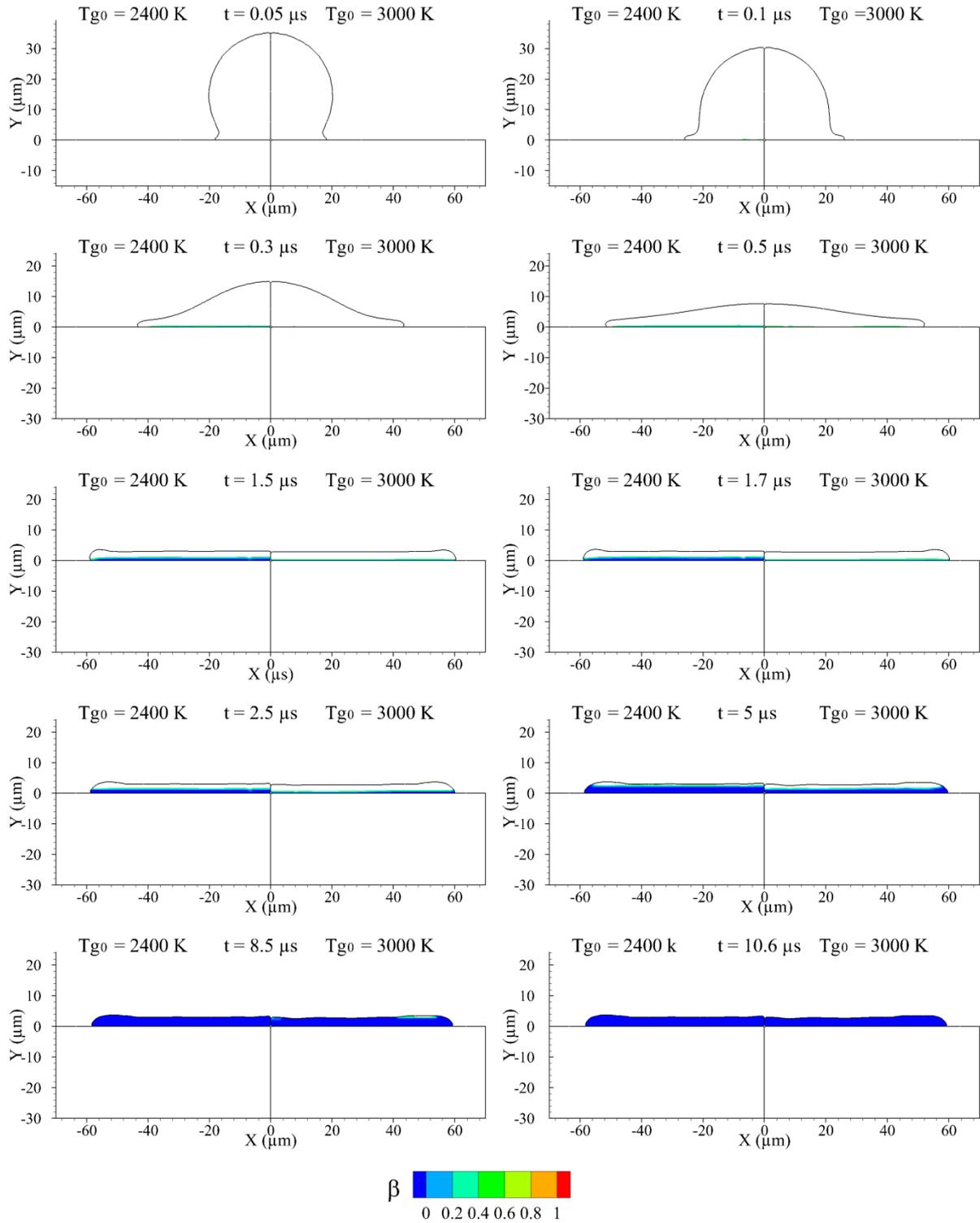


Figure III.17 Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, à $2400\ \text{K}$ et $3000\ \text{K}$ avec une vitesse de $100\ \text{m/s}$ sur le substrat en acier inoxydable à $450\ \text{K}$.

Chapitre III : Résultats et discussions

initiale de la gouttelette sur l'épaisseur de la lamelle est remarquée sur la figure III.18b et III.18d, car l'épaisseur finale de la lamelle est de $3.74\ \mu\text{m}$ pour la gouttelette initialement à $2400\ \text{K}$, contre $3.66\ \mu\text{m}$ pour la gouttelette initialement à $3000\ \text{K}$.

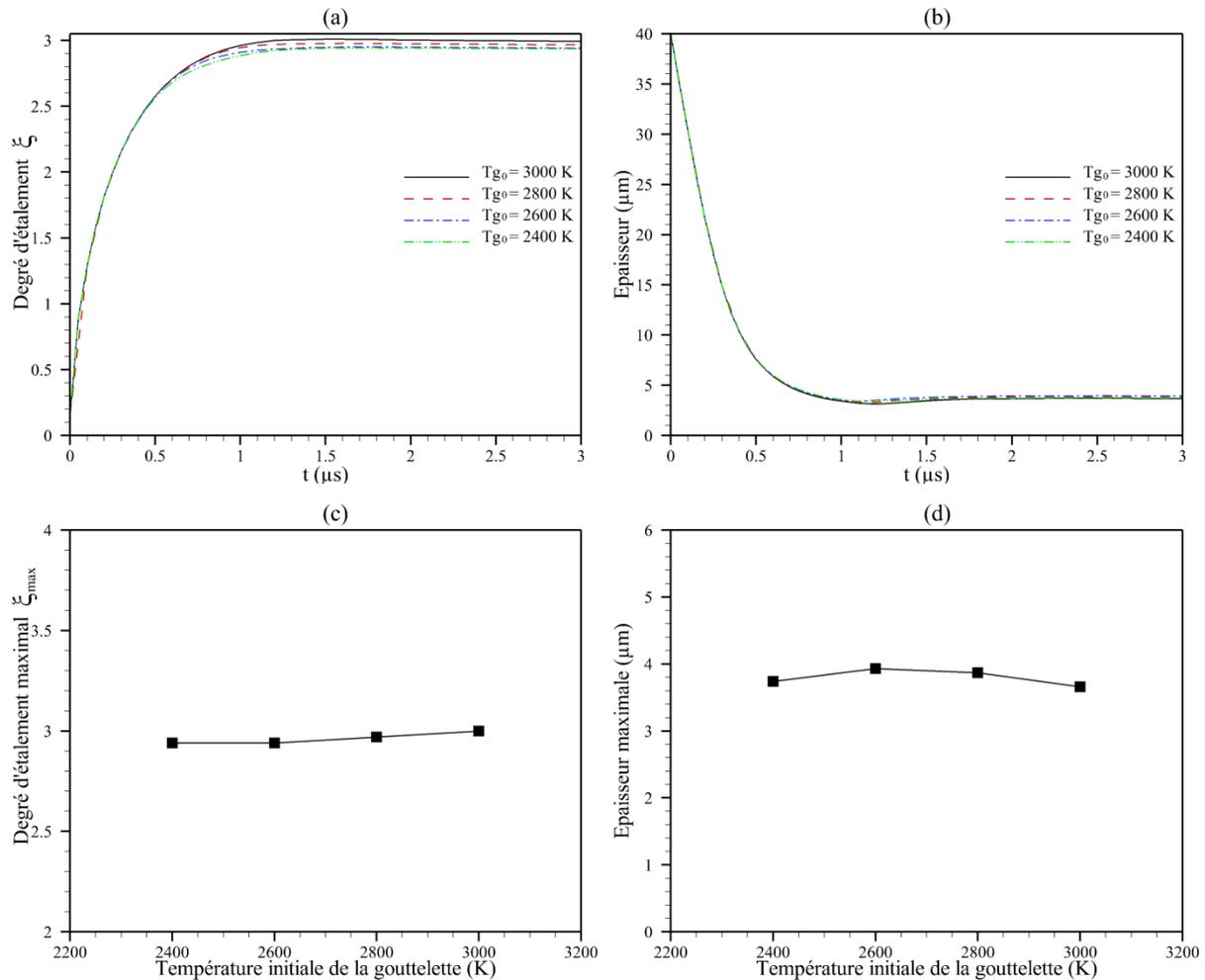


Figure III.18 Evolution temporelle du degré d'étalement (a) et de l'épaisseur de la gouttelette (b) pour différentes température initiales de la gouttelette. Variation du degré d'étalement maximale (c) et de l'épaisseur maximale (d) en fonction de la température initiale de la gouttelette.

III.2.3. Effet de la température initiale du substrat

Afin d'examiner l'effet de préchauffage du substrat sur l'étalement et la solidification de la gouttelette, des simulations ont été réalisées pour différentes valeurs de températures initiales du substrat. Le diamètre, la vitesse et la température de la gouttelette à l'impact sont $40\ \mu\text{m}$, $100\ \text{m/s}$ et $2800\ \text{K}$ respectivement. Le substrat est préchauffé à $300\ \text{K}$, $450\ \text{K}$, $600\ \text{K}$

Chapitre III : Résultats et discussions

et 750 K. L'interface entre la gouttelette et le substrat est représenté par une résistance thermique de contact de $10^{-7} m^2 K/W$. La figure III.19 représente la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat, ainsi que l'étalement de la gouttelette. La partie gauche de chaque image illustre le résultat pour une température initiale du substrat de 300 K et la partie droite pour une température initiale de 750 K. La gouttelette impactant le substrat initialement à 300 K, atteint un diamètre maximal de 118 μm et une épaisseur de 3.9 μm au bout de 1.5 μs . Par contre, la deuxième gouttelette qui s'étale sur un substrat initialement à 750 K, atteint un diamètre maximal de 120 μm et une épaisseur de 3.7 μm après 1.7 μs . Cela peut être expliqué par le fait que la première gouttelette se solidifie avant la deuxième (figure III.21), ce qui permet à cette dernière de s'étaler et s'aplatir un peu plus que la deuxième.

Il est très claire d'après la figure III.19, que la gouttelette s'étalant sur un substrat initialement à 300 K, se refroidit plus rapidement que la gouttelette impactant le substrat initialement à 750 K. Contrairement à l'échauffement du substrat, car la température de la surface du substrat initialement à 750 K, atteint des valeurs très élevées, qui sont très proche du point de fusion (1690 K vs 1700K). Alors que, le substrat initialement à 300 K, la température de sa surface atteint au maximum une température de 1430 K, en raison de sa faible température initiale.

La figure III.20 montre, que pour des températures initiales élevées du substrat, la vitesse de refroidissement des lamelles est faible, et l'échauffement du substrat est plus important. Sur la figure III.20a, qui correspond à une température initiale du substrat de 300 K, le refroidissement de la gouttelette est très rapide. La surface de la lamelle atteint une température au-dessous du point de fusion (2327 K), après la solidification en palier à 7 μs . Par contre, pour le substrat initialement à 750 K (figure III.20d), le refroidissement de la lamelle est lent, car la surface de la lamelle atteint un température au-dessous du point de fusion qu'après 9.7 μs , puis elle subit un refroidissement rapide pour atteindre un température de 1270 K au bout de 40 μs , ce qui correspond à un taux de refroidissement de $3.82 \times 10^7 K/s$. Alors que, pour le cas du substrat initialement à 300 K après 40 μs la surface de la lamelle atteint 875 K, ce qui correspond à un taux de $4.81 \times 10^7 K/s$.

Chapitre III : Résultats et discussions

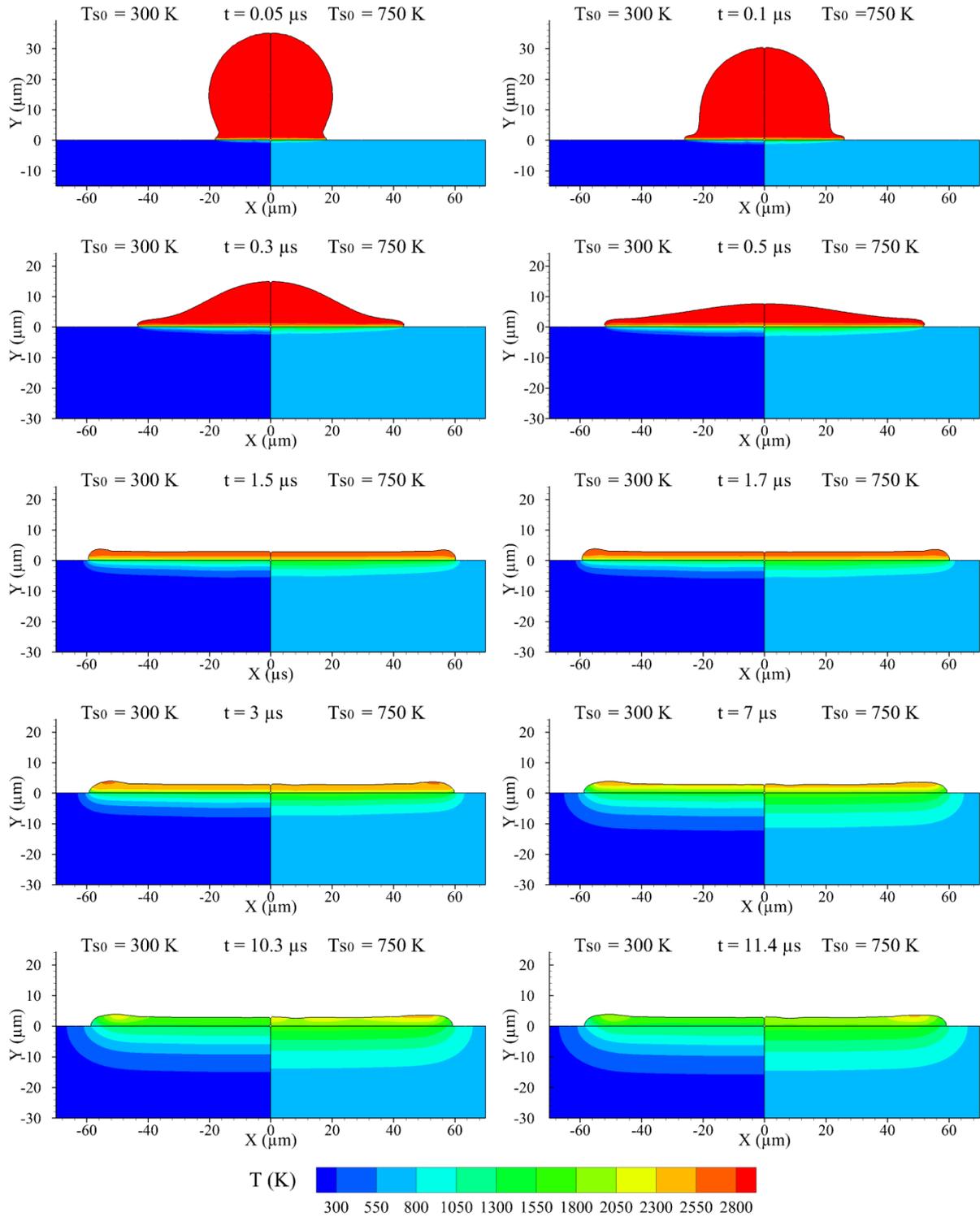


Figure III.19 Champs de température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre, à 2800 K avec une vitesse de 100 m/s sur un substrat en acier inoxydable à 300 K et 750 K.

Chapitre III : Résultats et discussions

Pour une température initiale faible du substrat, l'échauffement de ce dernier est relativement faible et pour une courte durée. Comme le montre la figure III.20a, la surface du substrat atteint une température maximale de 1430 K pour une courte durée, car le refroidissement du substrat commence après 8 μs . Contrairement au substrat initialement à 750 K, la surface atteint 1694 K, pour une longue période (10 μs).

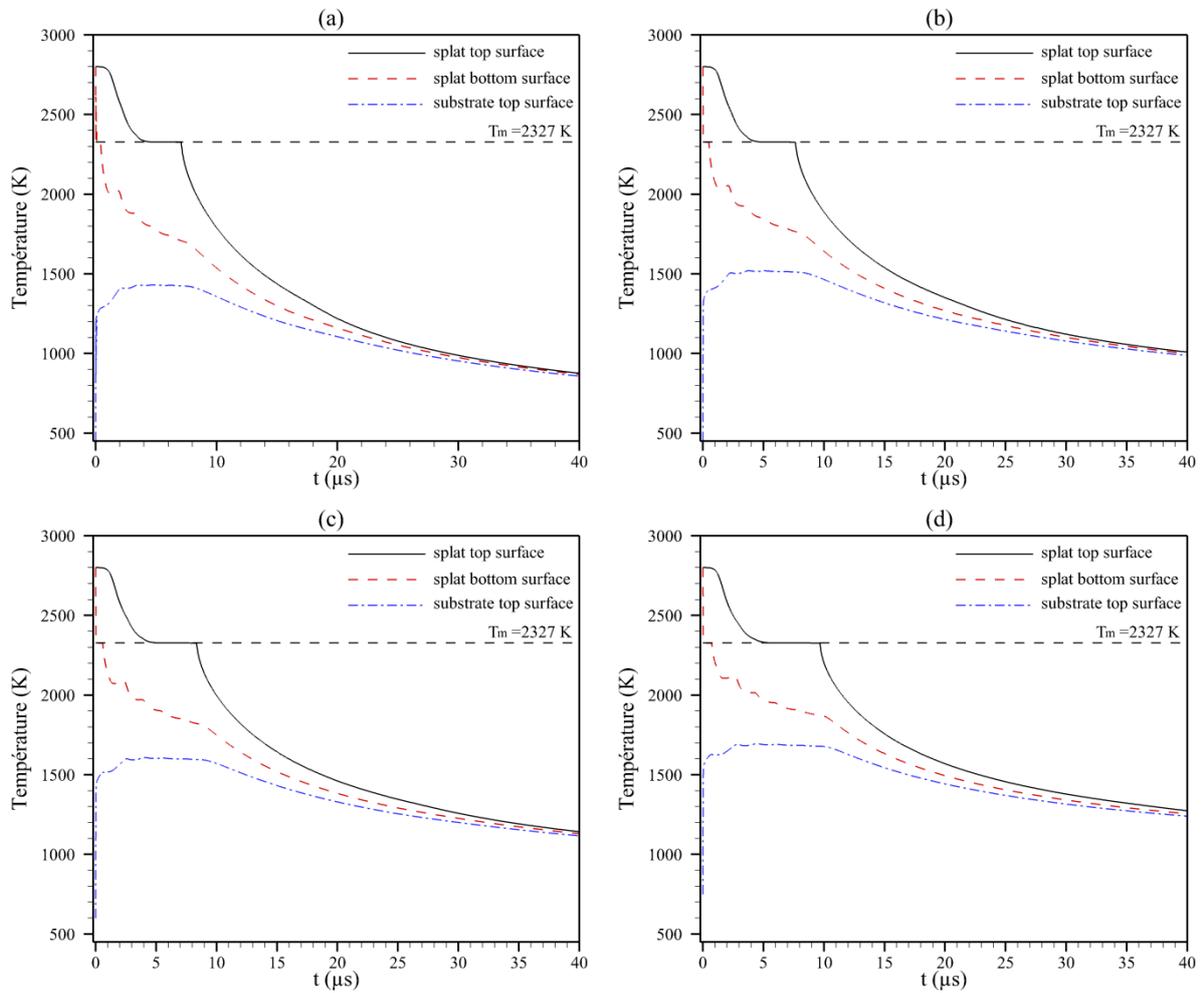


Figure III.20 Variation temporelle de la température au point de contact avec le substrat pour différentes températures initiales du substrat (a) $T_{s0} = 300$ K, (b) $T_{s0} = 450$ K, (c) $T_{s0} = 600$ K, (d) $T_{s0} = 750$ K

Chapitre III : Résultats et discussions

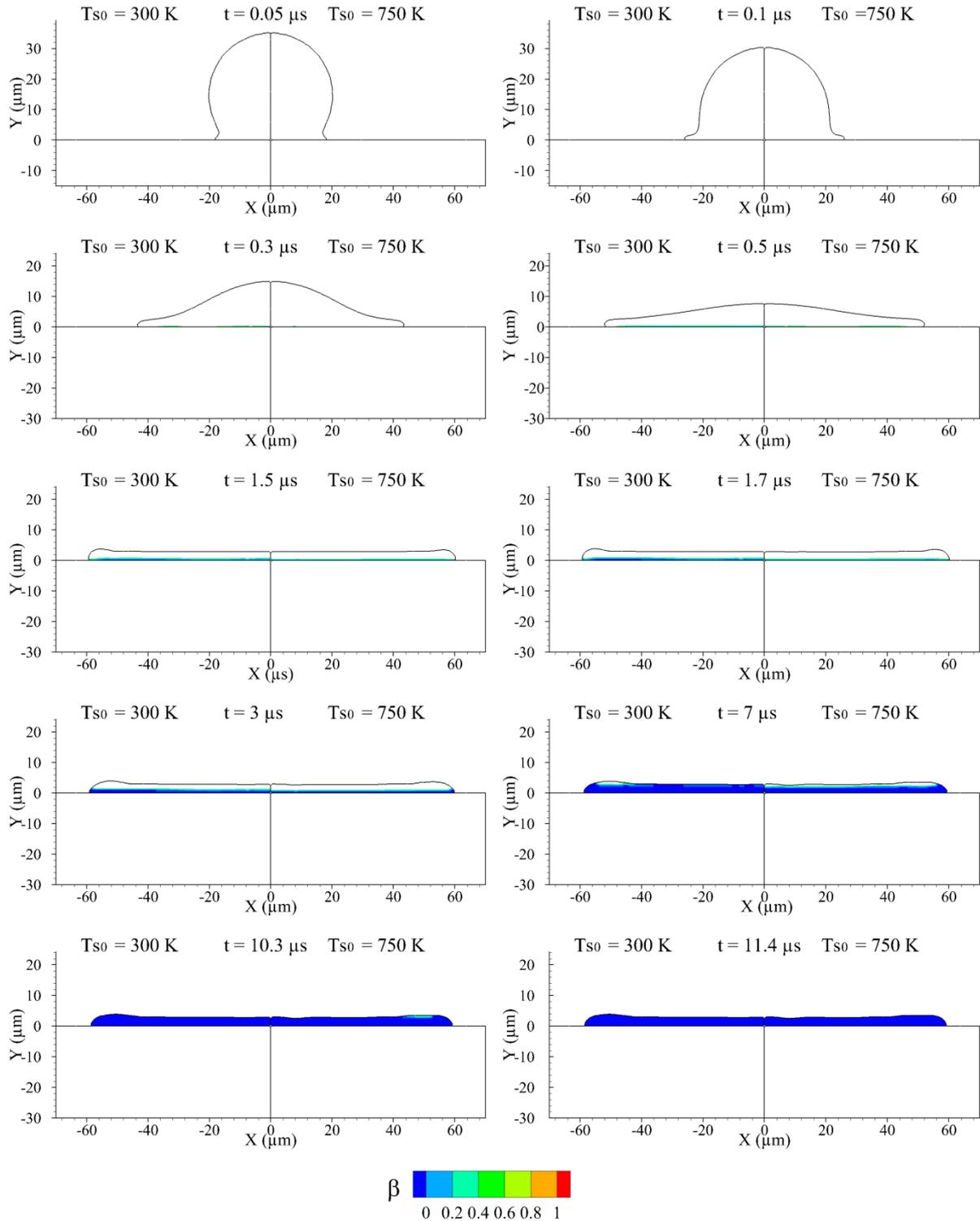


Figure III.21 Solidification lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40\ \mu\text{m}$ de diamètre, à $2800\ \text{K}$ avec une vitesse de $100\ \text{m/s}$ sur le substrat en acier inoxydable à $450\ \text{K}$ et $750\ \text{K}$.

En raison du refroidissement rapide de la surface inférieure des deux gouttelettes, la solidification de cette partie commence juste après l'impact, à $0.3\ \mu\text{s}$ une couche fine de

Chapitre III : Résultats et discussions

solide est observée, pour le cas du substrat initialement à 300 K et à 0.5 μs pour le cas du substrat initialement à 750 K. La solidification progresse avant que les deux gouttelettes soient complètement étalées, elle est plus rapide pour la première gouttelette que la deuxième. Le temps de solidification d'une gouttelette impactant un substrat initialement à une température élevée est plus important, cela est bien observé sur la figure III.21, pour la première gouttelette la solidification s'achève après 10.3 μs et pour la deuxième 1.1 μs plus tard (11.4 μs).

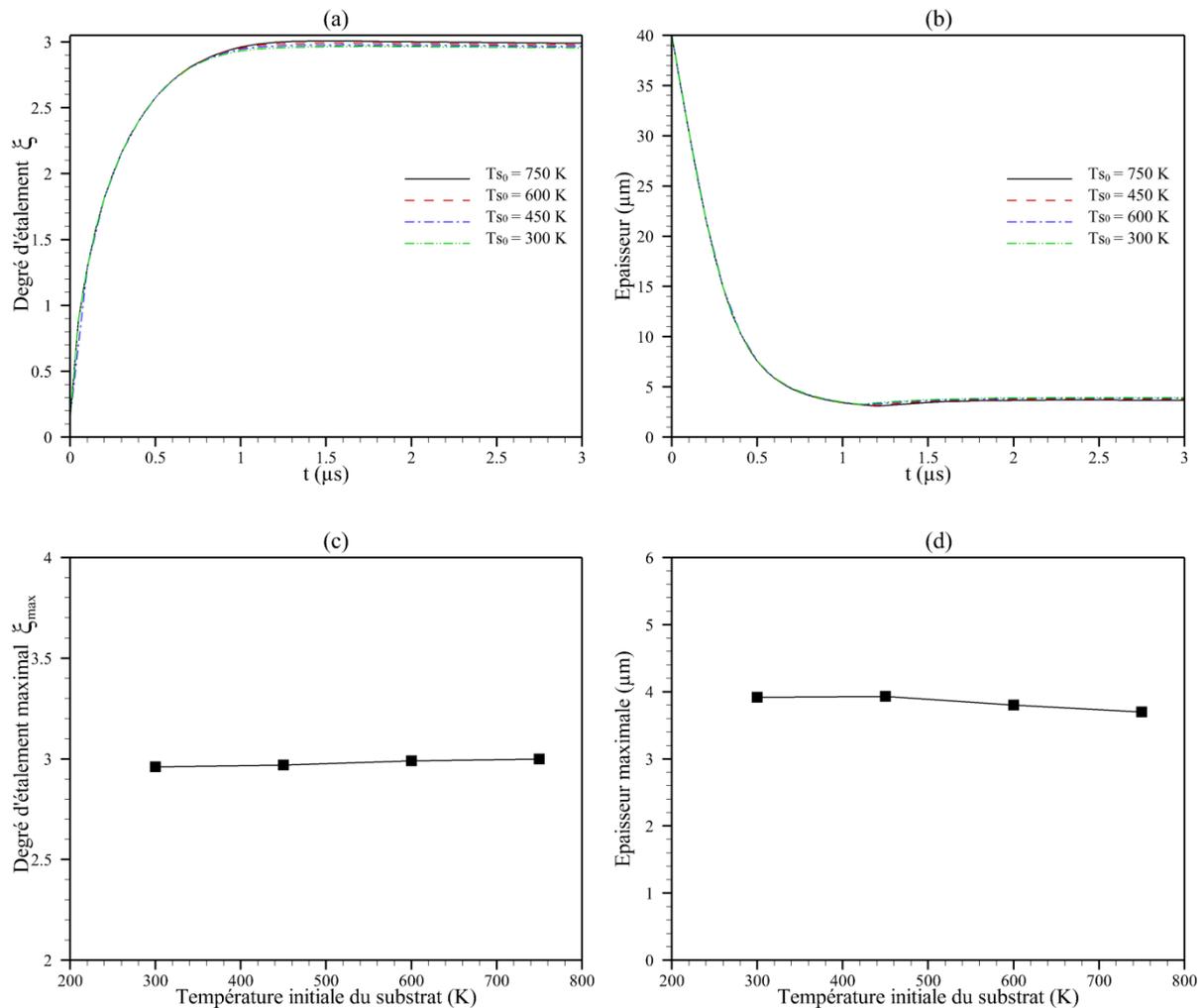


Figure III.22 Evolution temporelle du degré d'étalement (a) et de l'épaisseur de la gouttelette (b) pour différentes température initiales du substrat. Variation du degré d'étalement maximale (c) et de l'épaisseur maximale (d) en fonction de la température initiale du substrat.

L'effet de la température initiale du substrat sur la morphologie de la lamelle est représenté sur la figure III.22. Un très faible effet de la température initiale du substrat sur le degré d'étalement est observé sur la figure III.22a. Plus la température initiale du substrat est

Chapitre III : Résultats et discussions

élevée, plus l'étalement de la gouttelette est légèrement important et rapide. Pour une température initiale du substrat de 300 K un degré d'étalement maximal de 2.96 est atteint à 1.5 μ s. Par contre, pour une température initiale de 750 K un degré d'étalement maximal de 3 est atteint à 1.7 μ s. Une très légère influence de la température initiale du substrat sur l'épaisseur de la lamelle est remarquée sur la figure III.18b et III.18.d, car l'épaisseur finale de la lamelle est de 3.92 μ m pour le substrat initialement à 300 K, contre 3.7 μ m pour le substrat initialement à 750 K.

III.3 Impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en aluminium

Lors de l'impact des gouttelettes fondues et à des températures élevées sur un substrat, la fusion de ce dernier peut survenir. Cette fusion peut améliorer la force d'adhérence entre le revêtement et le substrat. Afin d'étudier ce phénomène, l'impact d'une gouttelette d'alumine (Al_2O_3) sur un substrat en aluminium (Al) dans les conditions de projection plasma est examiné. La vitesse de 150 m/s de la gouttelette à l'impact est considérée, le substrat est préchauffé à 450 K, l'interface entre la gouttelette et le substrat est représenté par une résistance thermique de contact de $10^{-8} \text{m}^2 \text{K/W}$. Il faut noter qu'une faible résistance thermique de contact est considérée, car la fusion du substrat favorise un bon contact entre la gouttelette et le substrat [107]. Le mélange entre la gouttelette et la partie fondue du substrat n'est pas considéré. L'interface entre le substrat et la gouttelette ne change pas et reste dans son état initial. De plus l'éjection de matière fondue de substrat ne se produit pas [94]. L'influence de la taille de la gouttelette et de sa température initiale sur son étalement et sa solidification, ainsi que sur la fusion du substrat sera étudié en détail. Les dimensions du domaine de calcul ainsi que les conditions aux limites sont mentionnées dans la Figure III.23. Un domaine 2D-axisymétrique est considéré pour la simulation. Les parois du côté et du fond de substrat sont maintenues à une température de 300 K. les limites extérieures sont considérées comme sortie de pression et sont maintenues aussi à une température de 300 K. La profondeur du substrat a été choisie pour garantir que la température de surface inférieure du substrat est constante et égale à 450 K. Les propriétés thermo physiques de l'alumine et de l'aluminium sont données dans la table III.3.

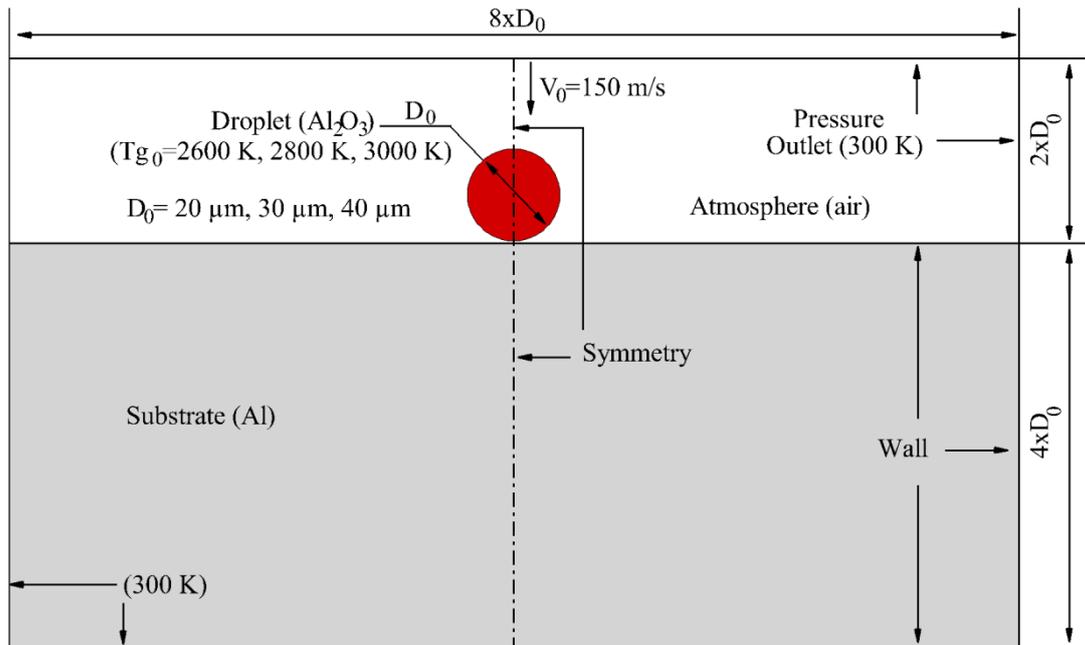


Figure III.23 Domaine 2D axisymétrique pour la simulation de l'impact de la gouttelette sur le substrat.

Tableau III.3 Propriétés thermo physiques de la gouttelette et le substrat.

Propriétés	Alumina (Al ₂ O ₃)	Aluminium (Al)
Densité (kg/m ³)	3990	2390
Conductivité thermique (W/m K) (sol)	5.9	210
Conductivité thermique (W/m K) (liq)	7.86	105
Chaleur spécifique (J/kg K) (sol)	1273	1080
Chaleur spécifique (J/kg K) (liq)	1358	1080
Viscosité cinématique (m ² /s)	1.026x10 ⁻⁵	
Tension superficielle (N/m)	0.69	
Point de fusion (K)	2327	934
Chaleur latente de fusion (J/kg)	1.16x10 ⁶	3.97x10 ⁵

III.3.1 Effet du diamètre initial de la gouttelette

Des simulations ont été réalisées pour le cas d'impact d'une gouttelette d'alumine (Al₂O₃) de 20 μm (gouttelette A), 30 μm (gouttelette B) et 40 μm (gouttelette C) de diamètre, avec une vitesse de 150 m/s sur un substrat en aluminium (Al) à 450 K, la température initiale de chaque gouttelette est 2800 K. L'évolution de la température dans la gouttelette et le substrat, la solidification de la gouttelette, la fusion et la resolidification du substrat, ainsi que le degré d'étalement seront présentés et discutés.

Chapitre III : Résultats et discussions

La figure III.24 représente l'étalement de la gouttelette sur le substrat, ainsi que la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat. La partie gauche de chaque image de la figure montre le résultat de l'impact d'une gouttelette d'un diamètre initial de $30\ \mu\text{m}$ (gouttelette B) et la partie droite pour un diamètre de $40\ \mu\text{m}$ (gouttelette C). Sous l'effet de la force d'inertie, la gouttelette commence à s'étaler et à s'étendre radialement juste après son impact sur le substrat. L'étalement de la gouttelette B est plus rapide que la gouttelette C. Il a été remarqué que la gouttelette B atteint son étalement maximum à environ $0.52\ \mu\text{s}$, pour atteindre un diamètre maximal de $92\ \mu\text{m}$, alors que la gouttelette C atteint son étalement maximal à environ $0.72\ \mu\text{s}$ pour atteindre un diamètre maximal de $130\ \mu\text{m}$.

Une fois que la force d'inertie de la gouttelette est diminuée, la tension superficielle force la gouttelette à reculer. Il a été constaté que, le recul de la gouttelette B a commencé avant que la gouttelette C s'étale complètement, ce qui sera discuté par la suite en présentant le degré d'étalement. Après le recul, l'étalement de la gouttelette B se stabilise à partir de $1.2\ \mu\text{s}$ à cause de la solidification à l'interface du substrat, pareil pour la gouttelette C, mais l'étalement commence à se stabiliser à partir de $2.2\ \mu\text{s}$. Après leur étalement et solidification, les deux gouttelettes sont comme un disque aplati avec les bords légèrement surélevés, ceci est lié à l'accumulation de masse sous l'effet des forces de tensions superficielles. Néanmoins la lamelle qui correspond à la gouttelette C est plus épaisse que celle de la gouttelette B, avec une épaisseur maximale de $3.2\ \mu\text{m}$ contre $3\ \mu\text{m}$. La température de la gouttelette diminue, pour se refroidir et la température du substrat augmente, et d'une manière importante à l'interface entre la gouttelette et le substrat. Dans le cas de la gouttelette C, le transfert de chaleur dans la direction radiale et dans la profondeur du substrat et plus important que le cas de la gouttelette B, et ceci à cause de sa grande taille, qui contient plus d'énergie.

La figure III.25 illustre l'historique de la température en trois emplacements au centre de chaque gouttelette, à la surface supérieure et à la surface inférieure de la gouttelette étalée, ainsi qu'à la surface supérieure du substrat. La température de la surface inférieure de chaque gouttelette diminue rapidement pour atteindre des valeurs inférieures à la température de fusion, et la solidification commence pratiquement à $0.05\ \mu\text{s}$ pour les trois cas.

Chapitre III : Résultats et discussions

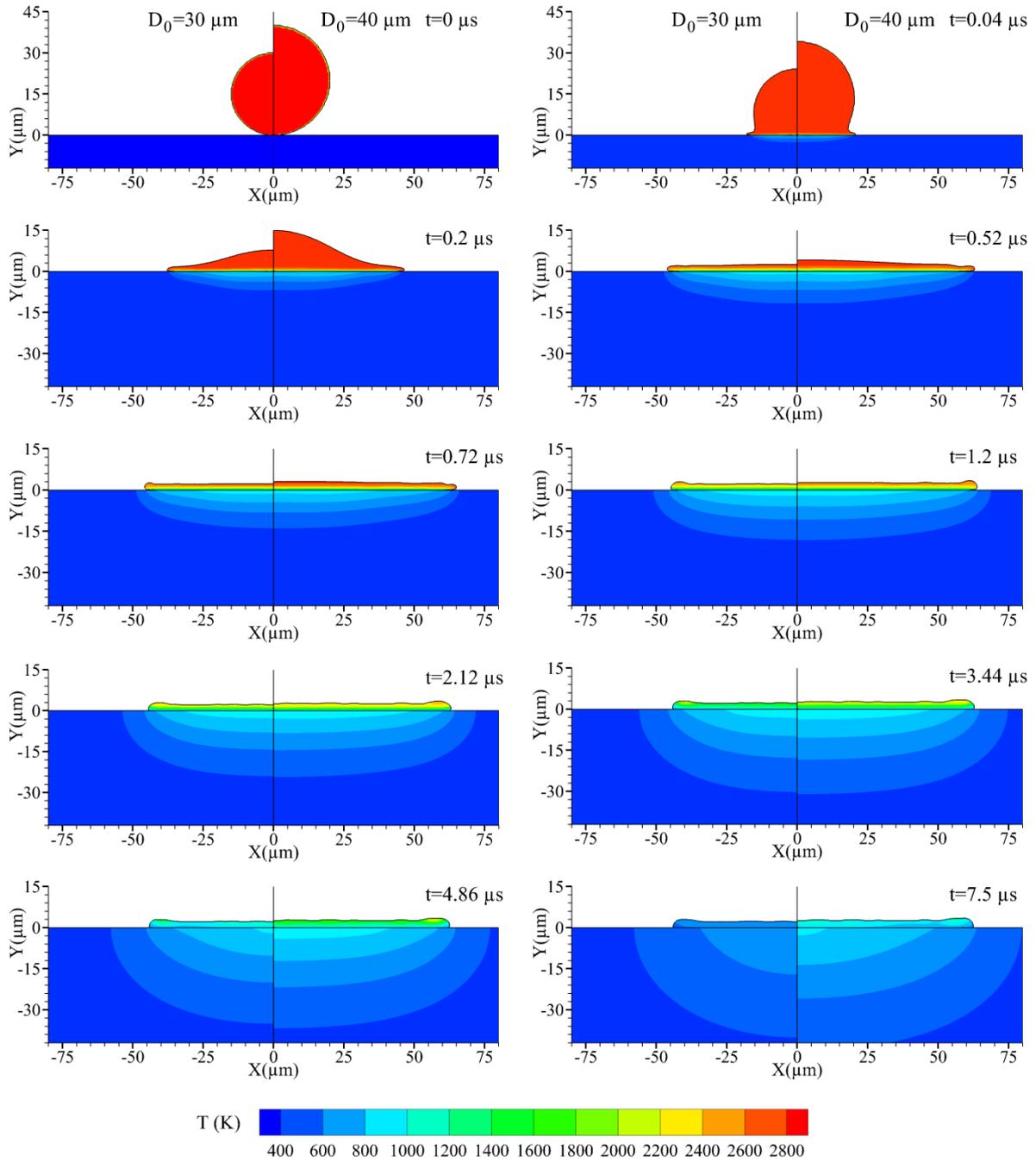


Figure III.24 L'étalement et la répartition de la température d'une gouttelette d'alumine à 2800 K, de 30 μm et 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.

Chapitre III : Résultats et discussions

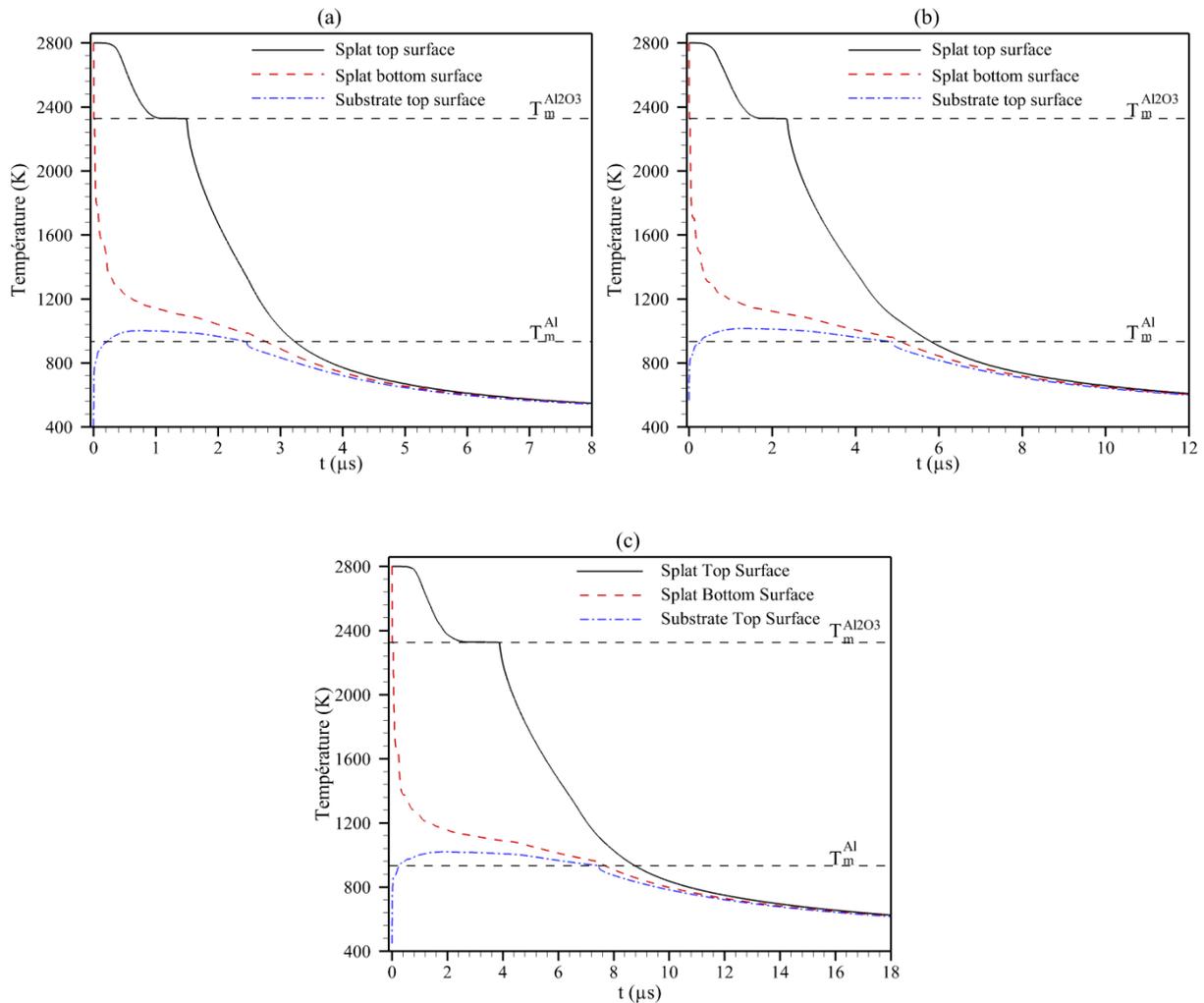


Figure III.25 Historique de la température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2800K, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s, de différents diamètres initiaux : (a) $D_0 = 20 \mu m$, (b) $D_0 = 30 \mu m$ et (c) $D_0 = 40 \mu m$

A ce moment la température de la surface supérieure du substrat augmente, pour dépasser la température de fusion, et le substrat commence à se fondre à partir de $0.28 \mu s$ pour les trois cas. La température de la surface supérieure de chaque gouttelette est maintenue constante à la température initiale (2800 K) pour un certain temps, pratiquement $0.2 \mu s$, $0.4 \mu s$ et $0.6 \mu s$ pour la gouttelette A, B et C respectivement. Le maintien de cette température est dû aux couches inférieures qui sont toujours à l'état de fusion. Puis la température diminue rapidement jusqu'à la température de la fusion, pour qu'une solidification en palier commence, cela est dû au dégagement de la chaleur latente. Le palier de solidification est autant plus long que la taille de la gouttelette est grande, la période du palier de solidification est de l'ordre de $0.5 \mu s$, $0.7 \mu s$ et $1.2 \mu s$ respectivement pour les gouttelettes A, B et C. La solidification est suivie par une phase de refroidissement très rapide, pour atteindre une

Chapitre III : Résultats et discussions

température d'équilibre pour les trois endroits, qui est proche de 600 K pour les trois cas de gouttelettes. Cette température est légèrement supérieure à la température initiale du substrat (450 K). La phase de refroidissement est plus rapide pour une taille de gouttelette plus petite. La température de la surface supérieure du substrat augmente pour atteindre son maximum, pour les trois cas de gouttelettes. Le substrat continue à se fondre de manière continue, car la température est maintenue presque constante par le dégagement de la chaleur latente provenant de chaque gouttelette. Après la solidification complète de chaque gouttelette, la température de la surface supérieure du substrat commence à baisser, le substrat entame alors sa resolidification. Cette situation favorise une bonne adhérence entre la lamelle et le substrat. La période de la fusion et la resolidification du substrat est d'autant plus importante que la taille de la gouttelette est importante.

La figure III.26 montre l'évolution temporelle du front de solidification pour la gouttelette, ainsi que le front de fusion dans le substrat. Juste après l'impact de la gouttelette, la température diminue rapidement à l'interface gouttelette/substrat. Par conséquent, de mince couche de solide apparaît dans la gouttelette B, ainsi que la gouttelette C à partir de $0.04\mu\text{s}$. A environ $0.2\mu\text{s}$, la température du substrat à l'interface gouttelette/substrat atteint la température de fusion de substrat, la fusion du substrat commence pour le cas de la gouttelette B et C. La solidification de la gouttelette et la fusion du substrat progressent, à $2.12\mu\text{s}$, la fusion du substrat pour le cas de la gouttelette B atteint son maximum, à cet instant la gouttelette B est proche de sa solidification complète, alors que la gouttelette C est presque à moitié solidifiée. Dans le cas de la gouttelette C, le substrat atteint sa fusion maximale à $3.44\mu\text{s}$, alors que la gouttelette C est presque complètement solidifiée, à ce moment la gouttelette B est déjà solidifiée. En raison du transfert de chaleur vers la profondeur du substrat par conduction, le substrat se refroidit et commence à se resolidifier, jusqu'à resolidification totale à $4.86\mu\text{s}$. Le substrat pour le cas de la gouttelette C est complètement resolidifié à $7.5\mu\text{s}$. Dans les deux cas de la gouttelette B et C, quand la fusion du substrat est à son maximum, la gouttelette étalée est presque complètement solidifiée. Cette situation favorise une bonne adhérence entre le dépôt et le substrat.

Chapitre III : Résultats et discussions

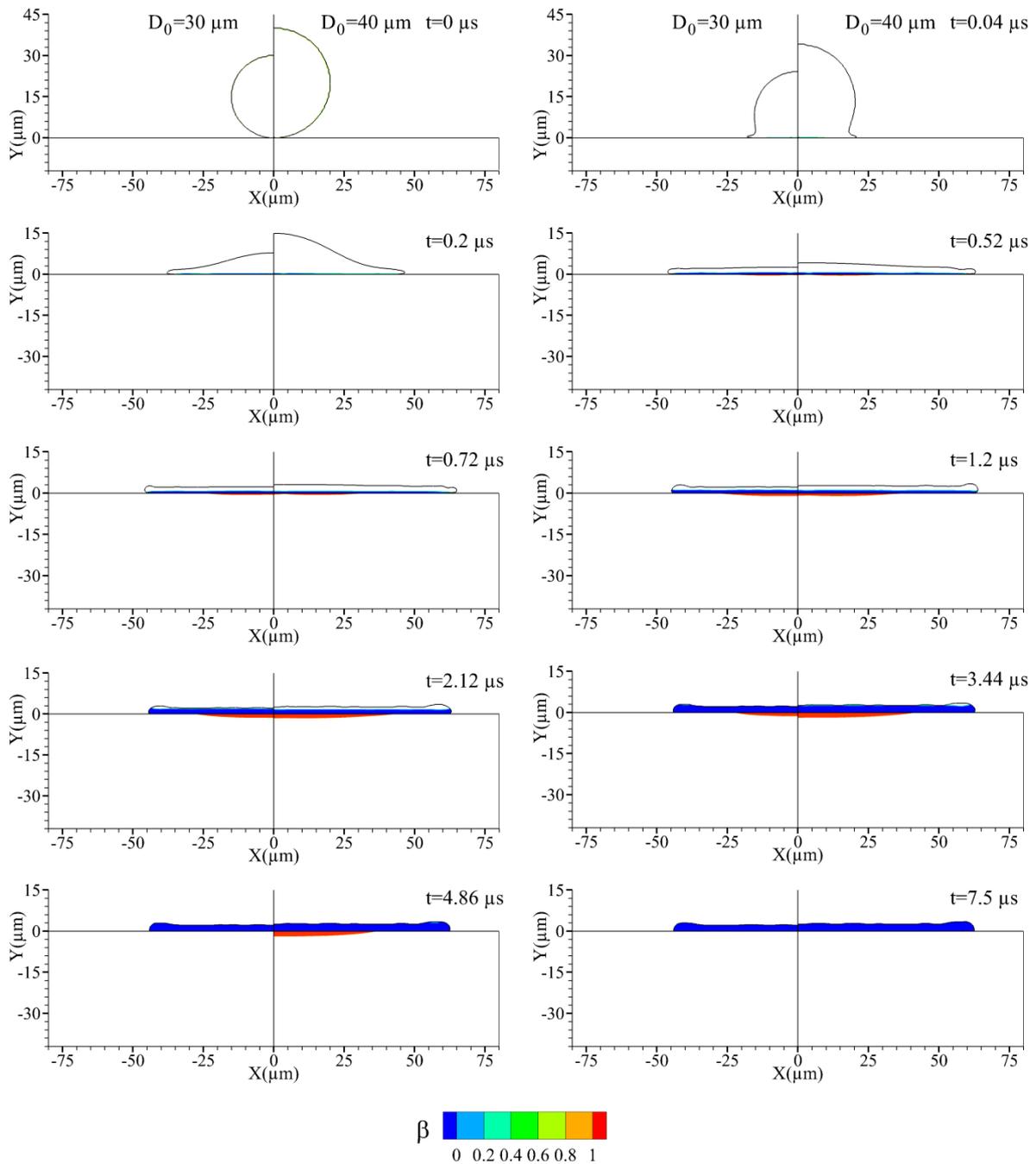


Figure III.26 Solidification de la gouttelette, la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2800K, de 30 μm et 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.

La figure III.27 représente la forte influence de la taille de la gouttelette sur la fusion du substrat. La figure III.27 (a) montre l'évolution temporelle du volume de substrat fondu en pourcentage par rapport au volume de chaque gouttelette. Le volume du substrat fondu augmente pour atteindre son maximum. La gouttelette de grande taille fait fondre plus le

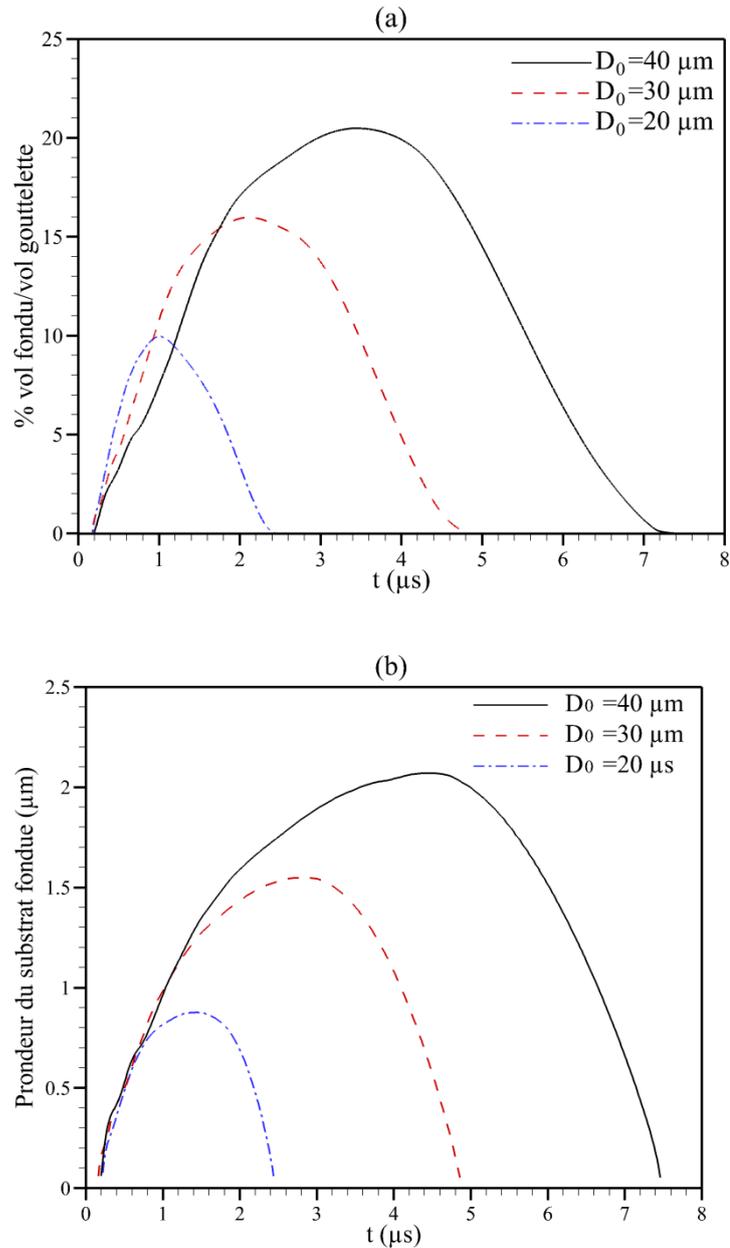


Figure III.27 Evolution de la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2800K, de 20 μm , 30 μm et 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s. (a) volume du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat.

substrat, le volume maximum est de l'ordre de 10%, 16% et 20.7% respectivement pour les gouttelettes A, B et C. Le volume du substrat fondu atteint son maximum à 1 μs , 2.12 μs et 3.44 μs respectivement pour les gouttelettes A, B et C. Après cet instant le substrat commence à se resolidifie à cause de la diminution du transfert de chaleur de la part des gouttelettes et le transfert de chaleur de la partie fondue du substrat vers la partie solide, qui est plus froide. Il

Chapitre III : Résultats et discussions

est constaté qu'il n'y a pas de symétrie entre la fusion et la resolidification, car le temps de la resolidification est plus important que le temps de la fusion. Pour les cas de gouttelettes A, B et C le substrat est complètement resolidifié après 1,46 μs , 2,74 μs et 4,06 μs respectivement.

La figure III.27 (b) montre l'évolution temporelle de la profondeur de fusion du substrat. La profondeur de fusion dans le substrat augmente pour atteindre une valeur maximale de 0,93 μs , 1,54 μs et 2,07 μs respectivement pour les gouttelettes A, B et C, ce maximum est atteint à 1,32 μs , 2,82 μs et 4,46 μs respectivement pour les trois gouttelettes. La profondeur de fusion du substrat atteint le maximum un peu plus tard que le volume du substrat est à son maximum. Cela peut être expliqué par le fait que le volume du substrat fondu commence à diminuer en raison de la resolidification à partir des bords (figure III.25), alors qu'au centre du substrat la température est toujours supérieure au point de fusion, ce qui fait fondre plus le centre du substrat vers la profondeur (figure III.26a et III.26c). La profondeur diminue en suite sous l'effet de la resolidification du substrat, le temps de la diminution de la profondeur est plus court que le temps pour lequel la profondeur atteint son maximum, contrairement au volume du substrat fondu (figure III.27a).

La figure III.28 illustre la relation entre le volume maximal du substrat fondu, la profondeur maximale de fusion du substrat ainsi que le temps de fusion et de la resolidification du substrat et la taille de la gouttelette. La figure III.28a, montre qu'il existe une proportionnalité presque linéaire entre le volume maximale du substrat fondu et la taille de la gouttelette. La gouttelette C initialement à un diamètre de 40 μm induit un volume maximal du substrat fondu presque deux fois plus que la gouttelette A initialement à un diamètre de 20 μm (20,7% contre 10%), et la fusion et la resolidification du substrat presque trois fois plus longue (7,5 μs contre 2,46 μs). La même relation entre la profondeur maximale de fusion du substrat et la taille de la gouttelette peut être observée sur la figure III.28b, car la profondeur maximale de fusion induite par la gouttelette C est presque deux fois plus grande que celle induite par la gouttelette A (2,09 μm contre 0,94 μs). Il a été constaté que l'augmentation de la taille de la gouttelette a pour effet d'augmenter le volume du substrat fondu, la profondeur de fusion, ainsi que le temps de fusion et de la resolidification du substrat.

Chapitre III : Résultats et discussions

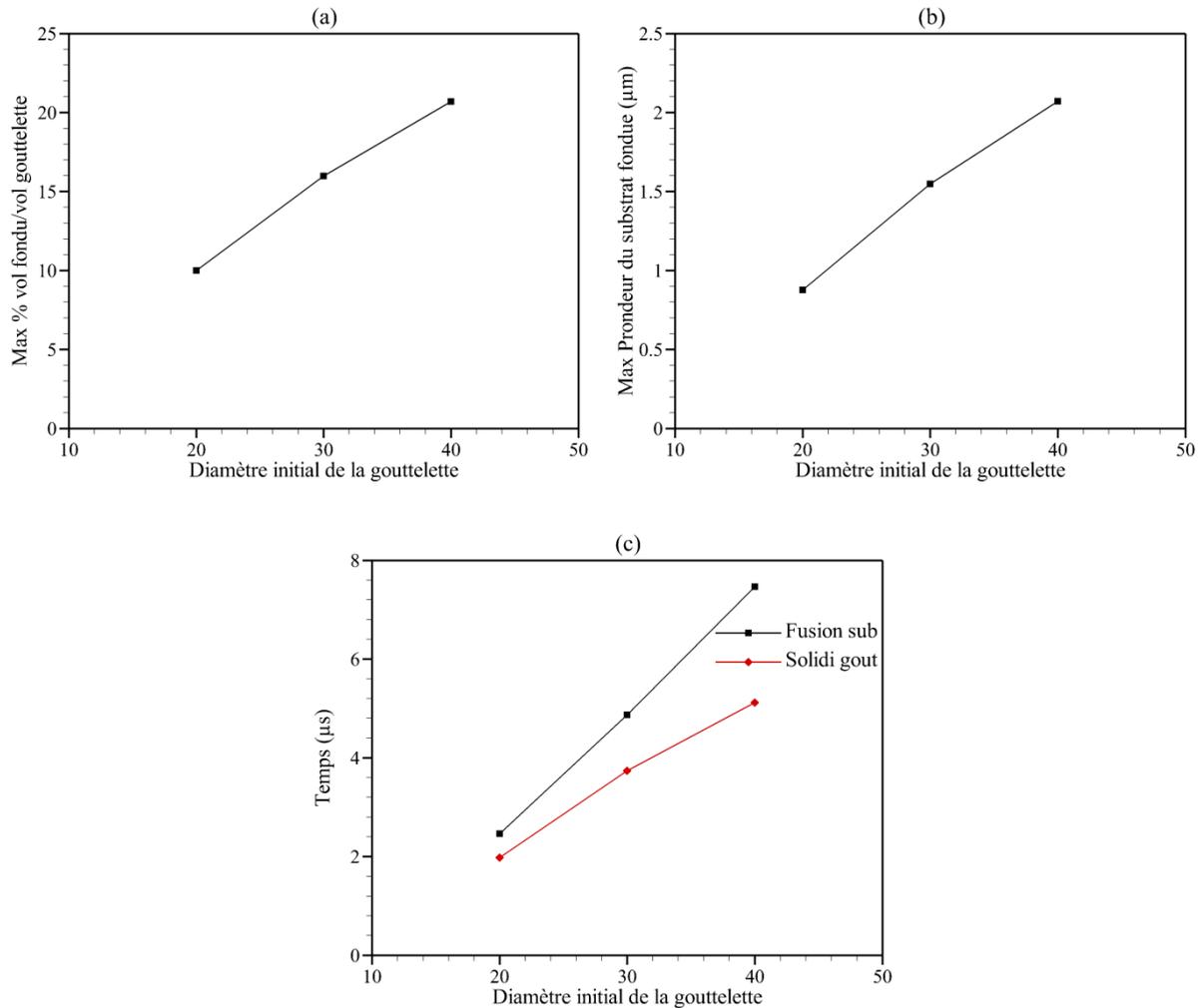


Figure III.28 Relation entre la fusion du substrat et le diamètre initial de la gouttelette, (a) Volume maximal du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat, (c) temps de fusion et resolidification du substrat ainsi que le temps de solidification de la gouttelette.

La figure III.29 montre la variation temporelle du degré d'étalement pour chaque gouttelette A, B et C, il augmente rapidement pour atteindre son maximum pour chaque gouttelette, ce maximum augmente avec la taille de la gouttelette, $\xi_{max} = 2.7, 3.07$ et 3.25 respectivement pour la gouttelette A, B et C. En outre, le temps nécessaire à la gouttelette pour atteindre son étalement maximal augmente avec sa taille. Les gouttelettes A, B et C atteignent leur étalement maximal respectivement à $0.4 \mu\text{s}$, $0.52 \mu\text{s}$ et $0.72 \mu\text{s}$. Après l'étalement maximum, et sous l'effet de tension superficielle, se produit le phénomène de recul, pour que l'étalement se stabilise enfin.

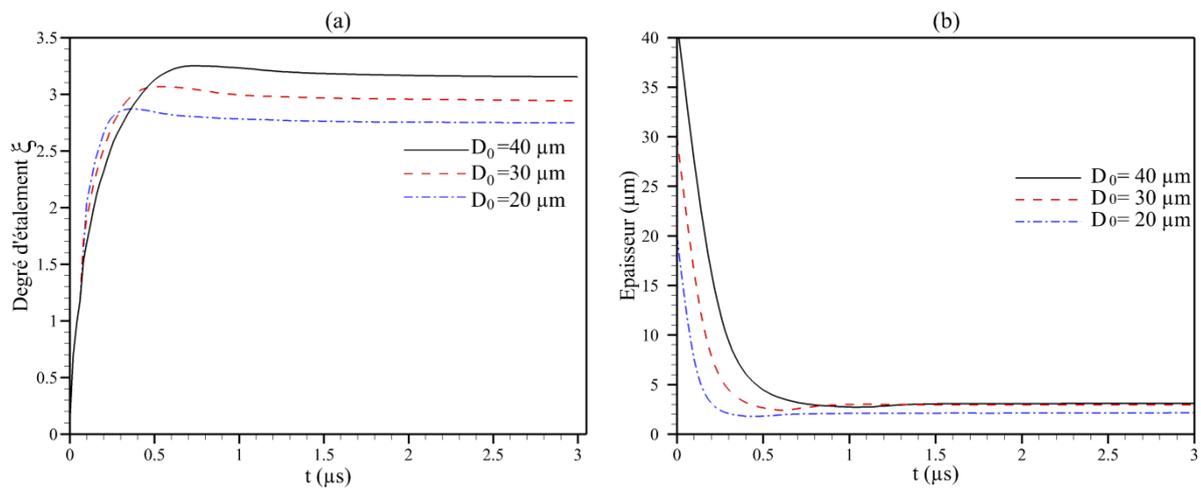


Figure III.29 Evolution du degré d'étalement lors de l'impact d'une gouttelette d'alumine à 2800K, de 20 μm, 30 μm et 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse de 150 m/s.

III.3.2 Effet de la température initiale de la gouttelette

Dans le but d'étudier l'effet de la température initiale de la gouttelette sur son étalement et sa solidification, ainsi que sur la fusion du substrat, des simulations ont été réalisées pour le cas de l'impact de gouttelettes d'alumine à 2600 K, 2800 K et 3000 K, de 40 μm de diamètre, avec une vitesse de 150 m/s, sur un substrat en aluminium à 450 K.

La figure III.30 illustre l'étalement de la gouttelette sur le substrat, ainsi que la distribution temporelle de la température dans la gouttelette et le substrat. La gouttelette initialement à 2600 K atteint son étalement maximum à 0.82 μs, pour atteindre un diamètre maximal de 127.3 μm, alors que la gouttelette initialement à 3000 K atteint son étalement maximum à 0.92 μs pour atteindre un diamètre maximal de 133.2 μm. Cela est expliqué par le fait que la partie inférieure de la première gouttelette se solidifie avant que de la deuxième gouttelette (figure III.32), en raison de sa faible température initiale (2600 K)

Chapitre III : Résultats et discussions

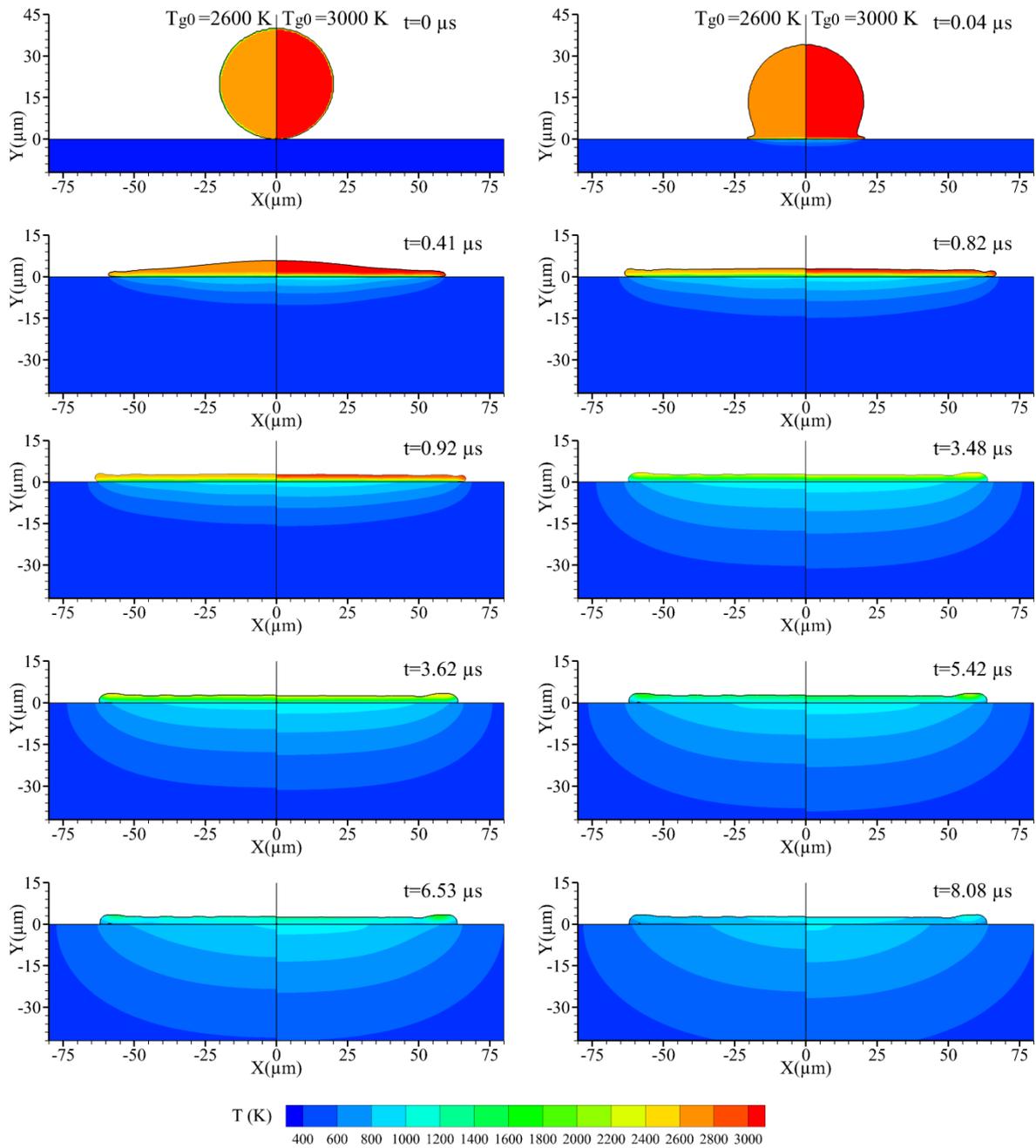


Figure III.30 L'étalement et la répartition de la température d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre à 2600 K et 3000 K, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.

Le recul de la gouttelette initialement à 3000 K est plus important, car la solidification des bords prend plus de temps par rapport à la gouttelette initialement à 2600 K. La température de la gouttelette diminue, pour se refroidir et la température du substrat augmente, et d'une manière importante à l'interface entre la gouttelette et le substrat. Pour le cas de la gouttelette initialement à 3000 K, le transfert de chaleur dans la direction radiale et

Chapitre III : Résultats et discussions

dans la profondeur du substrat et plus important que la deuxième gouttelette, et ceci à cause de sa température initiale très élevée.

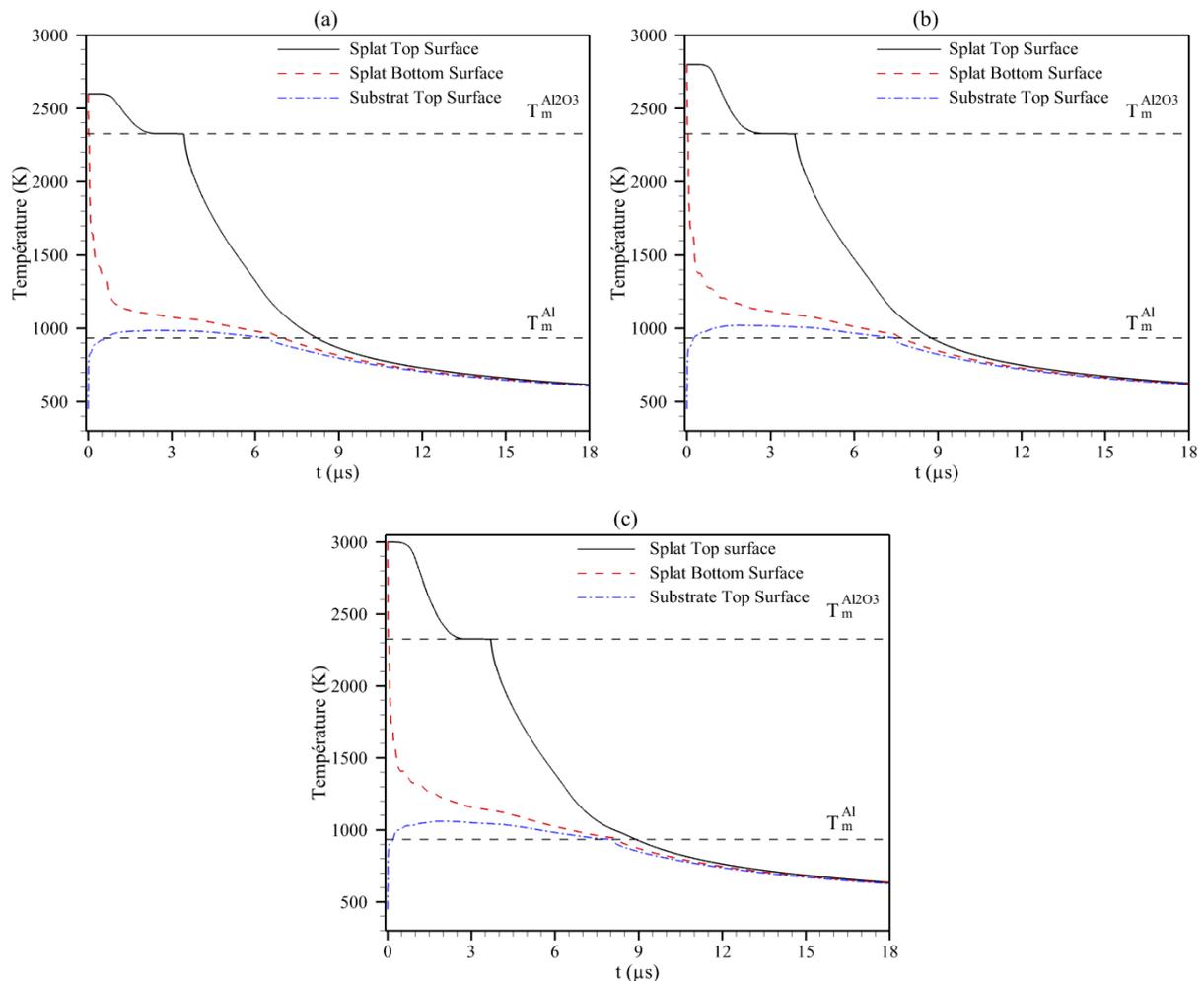


Figure III.31 Historique de la température lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de $40 \mu\text{m}$ de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K , avec une vitesse d'impact de 150 m/s , pour différentes température initiales : (a) $T_0 = 2600 \text{ K}$, (b) $T_0 = 2800 \text{ K}$ et (c) $T_0 = 3000 \text{ K}$

La figure III.31 illustre l'historique de la température, la surface inférieure de chaque gouttelette refroidie rapidement et la solidification commence pratiquement à $0.02 \mu\text{s}$, $0.025 \mu\text{s}$ et $0.035 \mu\text{s}$ respectivement pour les gouttelettes initialement à 2600 K , 2800 K et 3000 K . Cependant, la température de la surface supérieure du substrat augmente, pour dépasser le point de fusion, et le substrat commence à se fondre à partir de $0.72 \mu\text{s}$ pour le cas de la gouttelette initialement à 2600 K , la température continue à augmenter jusqu'à atteindre un maximum de 985 K , elle diminue ensuite, elle devient inférieure au point de fusion à $6.52 \mu\text{s}$, et le substrat commence à se resolidifier. Par contre, pour le cas de la gouttelette initialement à 3000 K , la température du substrat à ce point dépasse le point de fusion à $0.2 \mu\text{s}$, pour

Chapitre III : Résultats et discussions

atteindre une valeur maximale de 1060 K, ensuite la température diminue et elle devient inférieure au point de fusion à 8.06 μs . Une légère différence concernant le refroidissement de la surface supérieure des trois gouttelettes est observée, car la température diminue jusqu'à une valeur proche de 600 K au bout de 18 μs pour les trois cas, ce qui correspond à un taux de refroidissement de 1.1×10^8 K/s, 1.2×10^8 K/s et 1.3×10^8 K/s respectivement pour les gouttelettes initialement à 2600 K, 2800 K et 3000 K. Il faut noter que le refroidissement des gouttelettes impactant un substrat en aluminium est plus rapide que sur un substrat en acier, et cela est dû à la conductivité thermique élevée de l'aluminium.

La figure III.32 montre l'évolution temporelle du front de solidification pour la gouttelette, ainsi que le front de fusion dans le substrat. Une mince couche de solide apparaît dans les deux gouttelettes à partir de 0.04 μs . La solidification de la gouttelette initialement à 2600 K progresse plus rapidement que la gouttelette initialement à 3000 K, la première gouttelette est totalement solidifiée à 4.65 μs contre 5.42 μs pour la deuxième. La fusion du substrat se produit juste après l'impact des gouttelettes, la fusion du substrat progresse lors de l'étalement et la solidification des gouttelettes. Pour le cas de la gouttelette initialement à 2600 K, la fusion du substrat atteint son maximum à 3.48 μs , à cet instant la gouttelette est presque complètement solidifiée, le substrat entame ensuite sa resolidification, pour qu'il soit totalement solidifié à 6.53 μs . Pour le deuxième cas, la fusion du substrat est à son maximum à 3.62 μs et il est complètement resolidifié à 8.8 μs .

La figure III.33 représente l'influence de la température initiale de la gouttelette sur la fusion du substrat. La figure III.33a illustre l'évolution temporelle du volume de substrat fondu en pourcentage par rapport au volume de la gouttelette. La gouttelette initialement à une température élevée fait fondre plus le substrat, le volume maximum est de l'ordre de 9.3%, 20.5% et 33.7% respectivement pour les températures 2600 K, 2800 K et 3000 K. Le volume du substrat fondu atteint son maximum à 3.48 μs , 3.44 μs et 3.62 μs respectivement. Après cet instant le substrat commence à se resolidifier, Il est observé que le temps de la resolidification est plus important que le temps de la fusion. Pour les trois cas de températures initiales, le substrat resolidifie après 6.53 μs , 7.46 μs et 8,08 μs respectivement.

Chapitre III : Résultats et discussions

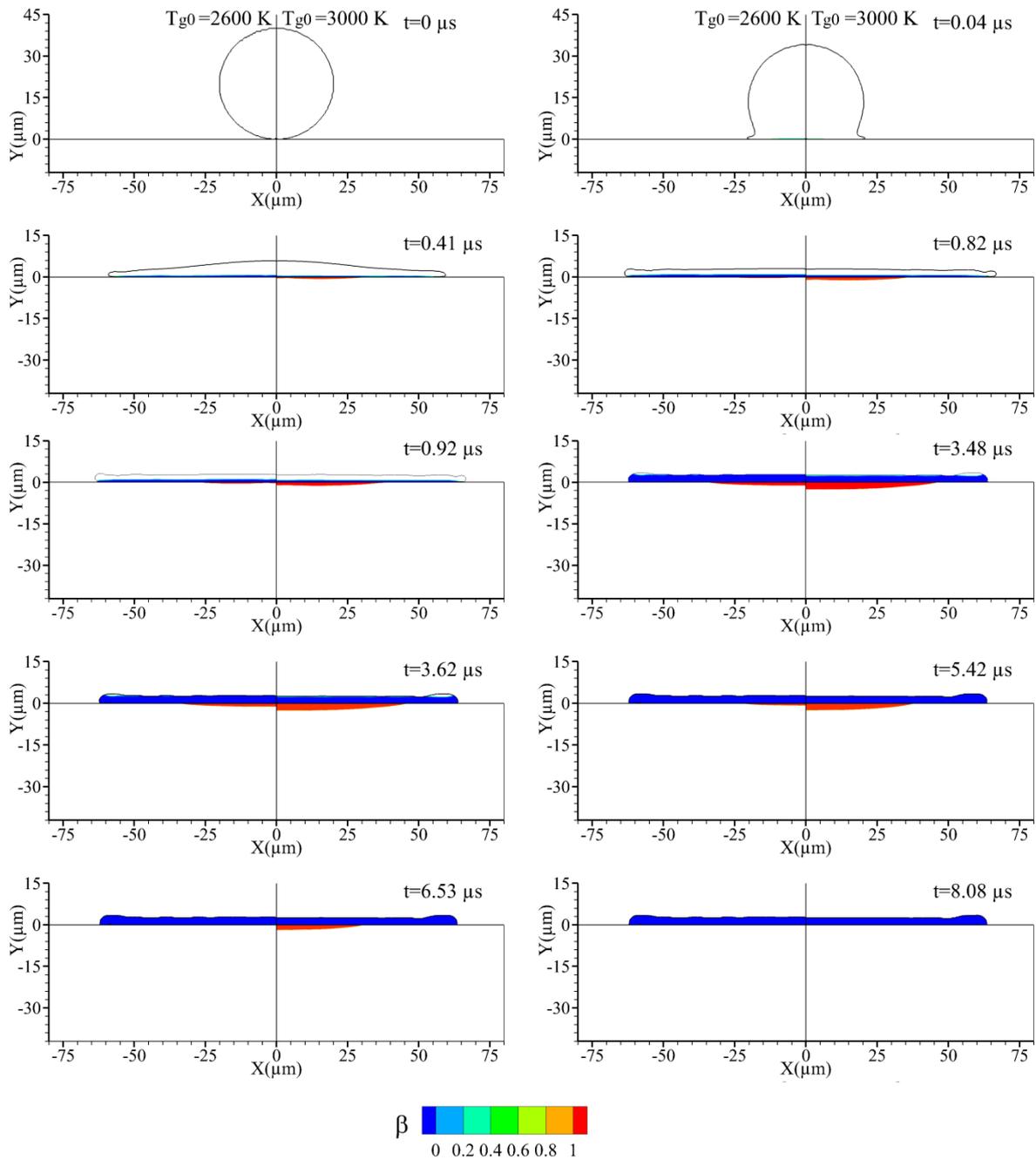


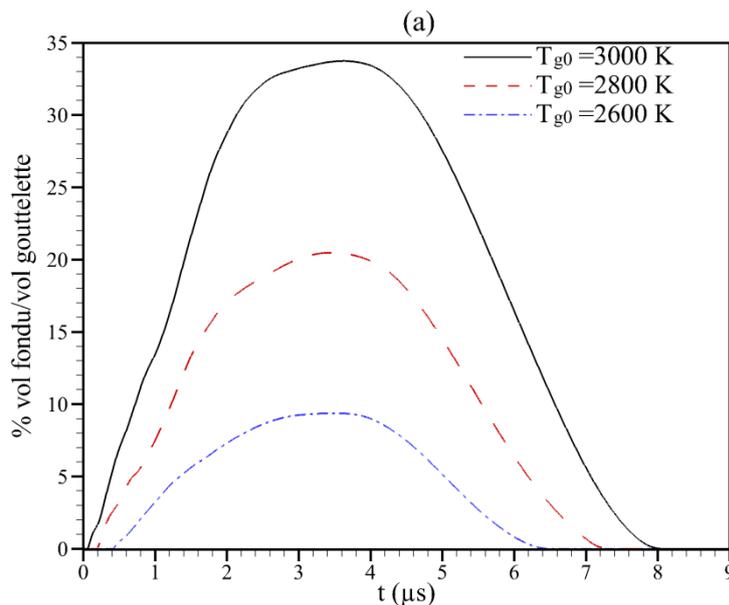
Figure III.32 Solidification de la gouttelette, la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine de 40 μm de diamètre à 2600 K et 3000 K, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s.

La figure III.33b montre l'évolution temporelle de la profondeur de fusion du substrat pour chaque température initiale. La profondeur de fusion maximale dans le substrat est de 1.3 μm , 2.07 μm et 2.82 μm respectivement, ce maximum est atteint à 4.08 μs , 4.46 μs et 4.46 μs . La profondeur diminue en suite sous l'effet de la resolidification du substrat, le temps de

Chapitre III : Résultats et discussions

la diminution de la profondeur et plus court que le temps pour lequel la profondeur atteint son maximum, contrairement au volume du substrat fondu (figure III.33a).

La figure III.34 illustre la variation du volume maximal du substrat fondu, la profondeur maximale de fusion ainsi que le temps de fusion du substrat et la solidification de la gouttelette en fonction de la température initiale de la gouttelette. La figure III.34a, montre qu'il existe une proportionnalité presque linéaire entre le volume maximale du substrat fondu et la température initiale. La gouttelette initialement à 3000 K induit un volume maximal du substrat fondu presque trois fois et demi plus que la gouttelette à 2600 K (33.7% contre 9.3 %). La même relation entre la profondeur maximale de fusion du substrat et la température initiale est observée sur la figure III.34b, car la profondeur maximale de fusion induite par la gouttelette initialement à 3000 K est presque deux fois plus grande que celle induite par la gouttelette initialement à 2600 K (2.82 μm contre 1.3 μm). Il faut noter que, pour une température initiale de la gouttelette élevée, le volume du substrat fondu est plus important et la fusion du substrat est plus profonde. Le temps de fusion du substrat est plus important que celui de la solidification de la gouttelette est constaté sur la figure III.34c, ce qui favorise une bonne adhérence entre le dépôt et le substrat.



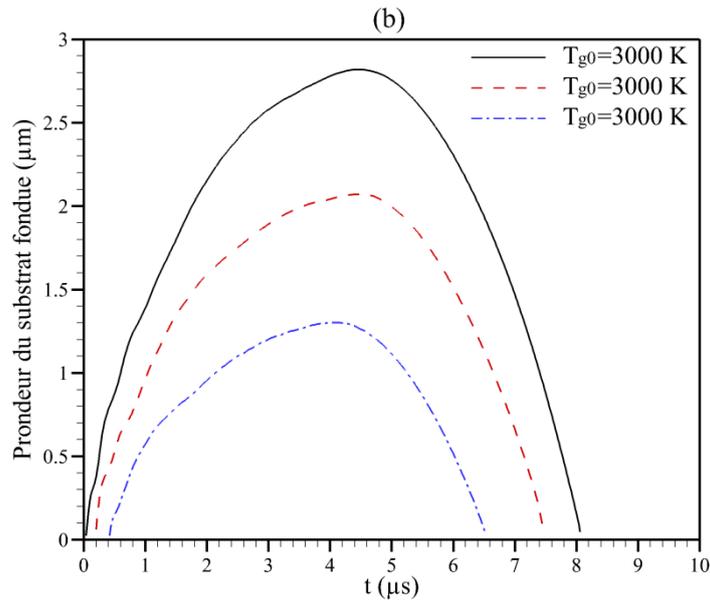
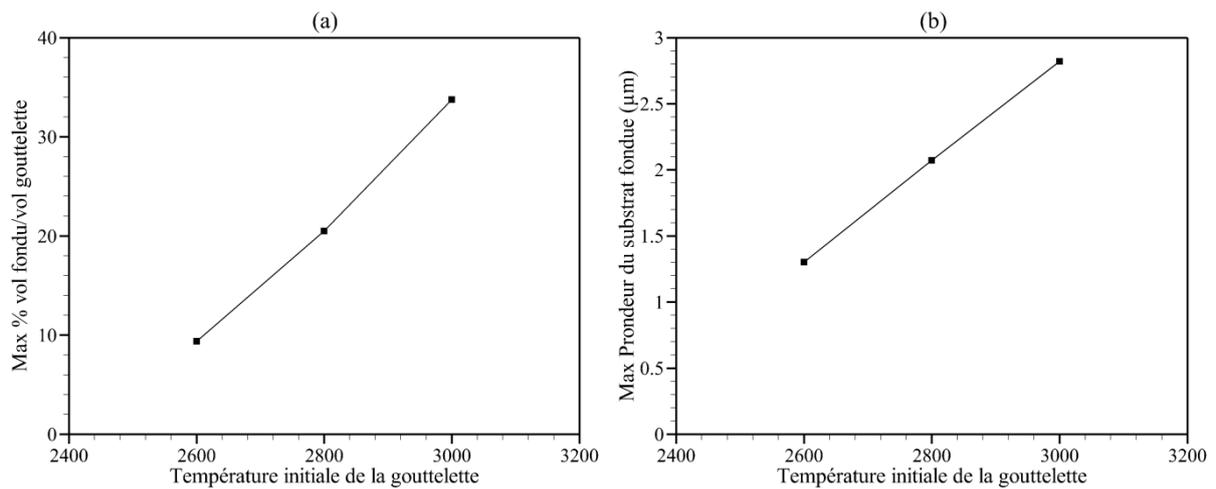


Figure III.33 Evolution de la fusion et la resolidification du substrat lors de l'étalement d'une gouttelette d'alumine à 2600 K, 2800 K et 3000 K de 40 µm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse d'impact de 150 m/s. (a) volume du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat.



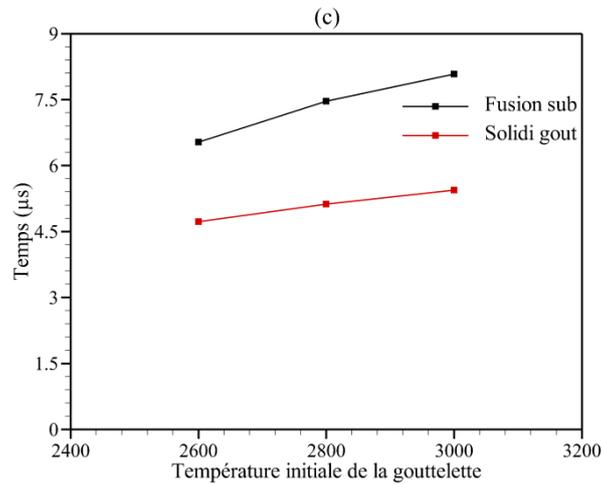


Figure III.34 Relation entre la fusion du substrat et la température initiale de la gouttelette, (a) Volume maximal du substrat fondu, (b) profondeur maximale de fusion du substrat, (c) temps de fusion et resolidification du substrat ainsi que le temps de solidification de la gouttelette.

La figure III.35 représente la variation temporelle du degré d'étalement et l'épaisseur de la gouttelette pour ses différentes températures initiales. Une faible influence de la température initiale de la gouttelette sur le degré d'étalement est observée sur la figure III.35a. Plus la température initiale est élevée, plus l'étalement de la gouttelette est légèrement important et rapide. Pour une température initiale de 2600 K un degré d'étalement maximal de 3.18 est atteint à 0.92 μs . Par contre, pour une température initiale de 3000 K un degré d'étalement maximal de 3.33 est atteint à 0.82 μs . Une très légère influence de la température initiale de la gouttelette sur l'épaisseur de la lamelle est remarquée sur la figure III.35b.

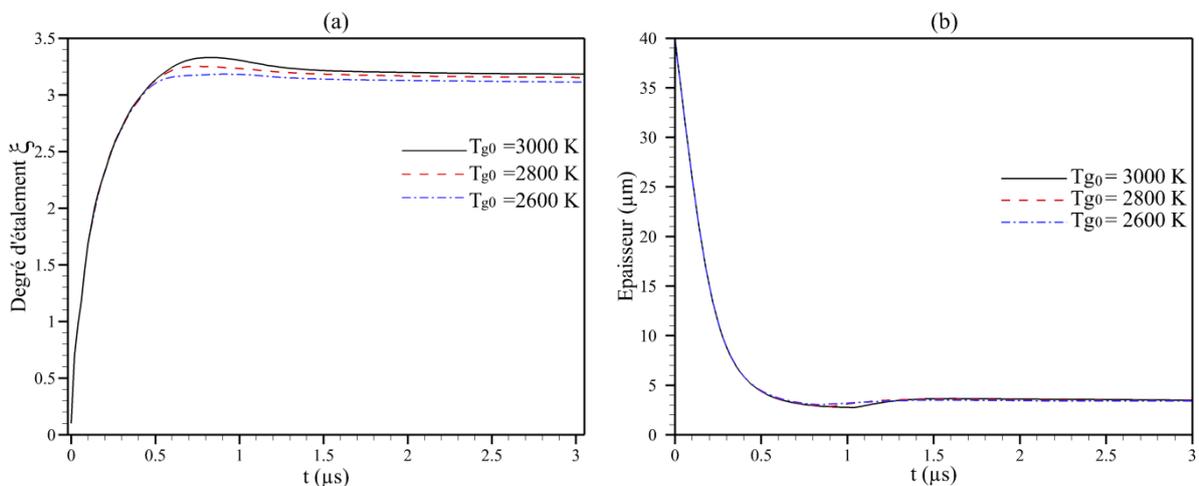


Figure III.35 Evolution du degré d'étalement lors de l'impact d'une gouttelette d'alumine à 2600 K, 2800 K et 3000 K de 40 μm de diamètre, sur un substrat en Aluminium à 450 K, avec une vitesse de 150 m/s.

Conclusion

Dans ce chapitre les principaux résultats obtenus par le modèle numérique ont été exposés. Ce modèle a permis de décrire correctement le phénomène de l'étalement et la solidification d'une gouttelette micrométrique en alumine impactant un substrat en acier inoxydable. La lamelle finale a une forme de disque parfait. L'influence de la vitesse d'impact et la température initiale de la gouttelette et du substrat a été déterminée. La morphologie de la lamelle dépend fortement de la vitesse contrairement à la température initiale. Le modèle a permis aussi de prédire la fusion du substrat, quand ce dernier possède un faible point de fusion. La taille et la température initiale de la gouttelette influent considérablement sur la fusion du substrat. Une corrélation entre la fusion et ces paramètres a été déduite grâce à ce modèle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le travail présenté, un modèle numérique a été développé pour étudier le dépôt de poudres céramique sur un substrat métallique en conditions de projection plasma. La qualité d'un dépôt réalisé dépend principalement de la morphologie d'une lamelle individuelle déposée sur le substrat. Le processus de l'étalement et de la solidification conditionne l'adhérence de la lamelle avec le substrat.

Le travail effectué consiste en une étude numérique, en premier temps de l'étalement et la solidification d'une gouttelette d'alumine sur un substrat en acier inoxydable. En second temps l'étalement et la solidification d'une gouttelette d'alumine sur un substrat en aluminium avec la prise en compte de la fusion et la resolidification du substrat.

Le modèle proposé, est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie en incluant le changement de phase solide/liquide, en utilisant la méthode des volumes finis dans un domaine 2D-axisymétrique. La méthode VOF est utilisée pour suivre la surface libre de la gouttelette. Le contact imparfait entre la gouttelette et le substrat est modélisé par une résistance thermique de contact. Le modèle est implémenté dans le logiciel Ansys Fluent 14.

La première partie des résultats, concerne l'étude de l'étalement et la solidification d'une gouttelette d'alumine impactant un substrat en acier inoxydable. La vitesse, la pression et la température ont été exposées en détail pendant la formation de la lamelle. Il a été remarqué que la solidification de la lamelle commence juste après l'impact de la gouttelette. La lamelle finale a une forme de disque avec les bords légèrement surélevés. L'étude paramétrique réalisée avec le modèle a démontré que la vitesse d'impact influe considérablement sur la morphologie de la lamelle. Plus la vitesse est importante plus l'étalement de la gouttelette est important et rapide ainsi que la solidification. Ceci améliore le contact de la lamelle avec le substrat, ce qui favorise considérablement une forte adhérence entre la lamelle et le substrat. Il a été constaté que la température initiale de la gouttelette et du substrat a un effet presque négligeable comparé à la vitesse d'impact.

Conclusion générale

La deuxième partie des résultats est dédiée à l'impact d'une gouttelette d'alumine sur un substrat en aluminium. Il a été observé que la fusion du substrat commence peu de temps après l'impact de la gouttelette. La fusion du substrat a atteint son maximum, tandis que la gouttelette n'est pas complètement solidifiée. Une gouttelette initialement à une température élevée contient plus d'énergie pour fondre davantage le substrat, ce qui favorise une bonne adhérence entre le revêtement et le substrat. En ce qui concerne l'effet de la taille de la gouttelette sur son étalement et la fusion du substrat, il a été observé qu'après la fin de l'étalement de la gouttelette, la lamelle a une forme de disque. Le diamètre et l'épaisseur finals de la lamelle sont autant plus grands que la taille initiale de la gouttelette est importante, même constatation pour le temps de l'étalement et de solidification. La fusion du substrat a été remarquée juste après l'impact. La fusion du substrat atteint son maximum avant que la gouttelette soit complètement solidifiée. La partie centrale du substrat reste en état de fusion quand la lamelle est complètement en état solide, ce qui avantage d'une manière importante l'adhérence entre la lamelle et le substrat. Le volume fondu du substrat, ainsi que la profondeur de fusion sont presque linéairement proportionnels avec la taille initiale de la gouttelette. D'après ces constatations la taille de la gouttelette a une importance dans la formation des revêtements réalisés par projection plasma, que ce soit sur la morphologie de la lamelle ou son adhérence avec le substrat.

Les perspectives de ce travail sont :

- Modèle 3D
- Une étude paramétrique qui utilise une gamme plus large pour les paramètres d'entrée du modèle (angle de contact, résistance thermique de contact, rugosité du substrat,...)
- Impact séquentiel de plusieurs gouttelettes
- Prendre en considération du mélange gouttelette/substrat dans cas de la fusion du substrat.

Références Bibliographiques

1. Matejka, D. and B. Benko. (1989). Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials. John Wiley & Sons, UK.
2. Davis, J.R. (2004). Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International, USA.
3. Fauchais, P. (2004). Understanding plasma spraying. Journal of Physics D: Applied Physics 37: p. 86-108.
4. Pawlowski, L. (2008). The science and engineering of thermal spray coatings, Second edition. John Wiley & Son, Ltd.
5. Fauchais, P., M. Fukumoto, A. Vardella, and M. Vardella. (2004). Knowledge concerning splat formation: an invited review. Journal of Thermal Spray Technology, 13(3), p 337.
6. Fauchais, P. and G. Montavon. (2007). Plasma spraying: from plasma generation to coating structure. Advances in Heat Transfer, 40, p 205-344.
7. D.E. Crawmer, (2013)Thermal Spray Processes, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, p 54-76.
8. Kreye H. (1989). Characteristics of coatings produced by high velocity flame spraying, Paper n° 24.1-24.9, 12th International Thermal Spraying Conference, London, 4-9 June.
9. Kadyrov E. (1996). Gas-particle interaction in detonation spraying systems, Journal of Thermal Spray Technology, 5(2), p 185-195.
10. <http://www.surfatec.org/>
11. Sundararajan, G. Sen, D. Sivakumar, G. (2005). The tribological behaviour of detonation sprayed coatings: the importance of coating process parameters. Wear, 258(1-4), p 377-391.
12. Fauchais P., Vardelle A. Dussoubs B. (2001). Quo Vadis Thermal Spraying? Thermal Spray Technology, 10 (1), p 44-66.
13. P.L. Ke, Y.N. Wu, Q.M. Wang, J. Gong, C. Sun, and L.S. Wen. (2005). Study on Thermal Barrier Coatings Deposited by Detonation Gun Spraying, Surf. Coat. Technol, 200(7), p 2271-2276.
14. M. Oksa, E. Turunen, T. Suhonen, T. Varis, and S.-P. Hannula. (2011). Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-Fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications, Coatings, 1(1), p 17-52.
15. Sampson E. R. (1998), Cored wire application using electric arc spray, Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century Ed. C. Coddet, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, p 133-137.
16. P. Fauchais, J. Heberlein; M. Boulos (2014). Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. Springer Science & Business Media.
17. Steenkiste, van T. and Smith, J.R. (2004). Evaluation of coatings produced via kinetic and cold spraying processes, J. Therm. Spray Technol, 13, p 274–282.

18. Irissou E, Legoux J-G, Ryabinin AN, Jodoin B, Moreau C. (2008). Review on cold spray process and technology: part I – intellectual property. *J Therm Spray Technol*, 17(4), p 495–516
19. Sampath S., Herman H. (1996). Rapid Solidification and Microstructure Development During Plasma Spray Deposition, *Thermal Spray Technology*, 5, p 445-456.
20. Fauchais P., Montavon G., Vardelle M., Cedelle J. (2006). Developments in direct current plasma spraying, *Surf. & Coat. Tech*, 201, p 1908–1921.
21. Fukumoto M., Shiba M., Haji H., Yasui T. (2005). Three-dimensional transition map of flattening behaviour in the thermal spray process, *Pure Appl. Chem*, 77 (2), p 429-442.
22. Chandra, S. and P. Fauchais. (2009). Formation of solid splats during thermal spray deposition, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(2), p 148-180.
23. Fukumoto, M. and Y. Huang. (1999). Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particles impinging on flat substrate surface *Journal of Thermal Spray Technology*, 8(3), p 427-432.
24. Fukumoto, M., E.Nishioka, and T. Nishiyama. (2002). New criterion for splashing in flattening of thermal sprayed particles onto flat substrate surface, *Surface and Coatings Technology*, 161, p 103-110.
25. Pershin, V., M. Lufitha, S. Chandra, and J. Mostaghimi, (2003). Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 12, p 370-376.
26. De Gennes, P., Brochart-Wyart, F., Quéré, D., Fermigier, M. et Clanet, C. (2002). Gouttes, bulles, perles et ondes. Belin Paris
27. Madejski, J. (1976). Solidification of droplets on a cold surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19, p 1009–1013.
28. Pasandideh-Fard, M., Bholra, R. M., Chandra, S. et Mostaghimi, J. (1998). Deposition of tin droplets on a steel plate, simulations and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(19), p 2929–2945.
29. Mundo, C., Sommerfeld, M. Tropea, C. (1995). Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2), p 151–173.
30. McDonald, A., M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi, and C. Moreau. (2007). Modeling fragmentation of plasma-sprayed particles impacting on a solid surface at room temperature. *Comptes Rendus Mécanique*, 335, p 351-356.
31. Pasandideh-Fard, M., S. Chandra, and J. Mostaghimi. (2002). A three-dimensional model of droplet impact and solidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: p 2229-2242.
32. Wang, G.X. and E.F. Matthys. (2002). Experimental determination of the interfacial heat transfer during cooling and solidification of molten metal droplets impacting on a metallic substrate: effect of roughness and superheat. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(25), p 4967-4981.
33. Wang, X.Y., H. Zhang, L.L. Zheng, and S. Sampath. (2002). An integrated model for interaction between melt flow and non-equilibrium solidification in thermal spraying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(11), p 2289-2301.

34. Loulou, T., E.A. Artyukhin, and J.P. Bardon. (1999). Estimation of thermal contact resistance during the first stages of metal solidification process: II—experimental setup and results. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(12), p 2129-2142.
35. Heichal, Y. and S. Chandra. (2005). Predicting thermal contact resistance between molten metal droplets and a solid surface. *Journal of Heat Transfer*, 127, p 1269- 1275.
36. McDonald, A., C. Moreau, and S. Chandra. (2007) Thermal Contact Resistance between Plasma-Sprayed Particles and Flat Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, p 1737-1749.
37. Dhiman, R., A.G. McDonald, and S. Chandra. (2007). Predicting splat morphology in a thermal spray process. *Surface & Coatings Technology*, 201, p. 7789-7801.
38. Pasandideh-Fard, M., V. Pershin, S. Chandra, and J. Mostaghimi. (2001). Splat shapes in a thermal spray coating process: simulations and experiments. *Journal of Thermal Spray Technology*, 11, p 206-217.
39. Kitahara, S. and A. Hasui. (1974) A study of the bonding mechanism of sprayed coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 11, p 747-752.
40. Steffens, H.-D., B. Wielage, and J. Drozak. (1991). Interface phenomena and bonding mechanism of thermally-sprayed metal and ceramic composites. *Surface and Coatings Technology*, 45(1-3), p. 299-308.
41. Zhang, H., X.Y. Wang, L.L. Zheng, and S. Sampath. (2004). Numerical simulation of nucleation, solidification, and microstructure formation in thermal spraying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, p 2191-2203.
42. Li, L., X.Y. Wang, G. Wei, A. Vaidya, H. Zhang, and S. Sampath. (2004). Substrate melting during thermal spray splat quenching. *Thin Solid Films*, 468(1-2), p 113-119.
43. Li, C.-J., C.-X. Li, G.-J. Yang, and Y.-Y. Wang. (2006). Examination of substrate surface melting induced splashing during splat formation in plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(4), p 717-724.
44. Zhang, W., G.H. Wei, H. Zhang, L.L. Zheng, D.O. Welch, and S. Sampath. (2007). Toward the achievement of substrate melting and controlled solidification in thermal spraying. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 27(6), p 717-736.
45. Dorfman, M. (2002). Thermal spray basics, *Advanced Material & Processes*, 160(12), p 47-50.
46. Mills, A.F. (1999). *Heat transfer*, 2nd ed.: Prentice-Hall, Upper Saddle River, NY.
47. Fujimoto, H., Y. Shiotani, A.Y. Tong, T. Hama, and H. Takuda. (2007). Threedimensional numerical analysis of the deformation behavior of droplets impinging onto a solid substrate. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(3): p.317-332.
48. Fukumoto, M., H. Nagai, and T. Yasui. (2006). Influence of surface character change of substrate due to heating on flattening behavior of thermal spray particle. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(4), p 759-764.
49. Li, C.J., J.L. Li, and W.B. Wang. (1998). The effect of substrate preheating and surface organics covering on splat formation. In *Thermal spraying: meeting the challenges of the 21st century*. Nice, France : ASM International.

50. Zhang, H., X.Y. Wang, L.L. Zheng, and X.Y. Jiang. (2001). Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(24), p 4579-4592.
51. Jiang, X., W. Yuepeng, H. Herbert, and S. Sanjay. (2001). Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray. *Thin Solid Films*, 385(1-2), p 132-141
52. Fukumoto, M., T. Yamaguchi, M. Yamada, and T. Yasui. (2007). Splash splat to disk splat transition behavior in plasma-sprayed metallic materials. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(5-6), p 905-912.
53. Fukumoto, M., H. Hayashi, and T. Yokoyama. (1995). Relationship between particles splat pattern and coating adhesive strength of HVOF sprayed Cu-alloy. *Japan Thermal Spraying Society*, 32(3), p 149-156.
54. Cedelle, J., M. Vardelle, and P. Fauchais. (2006). Influence of stainless steel substrate preheating on surface topography and on millimeter- and micrometer-sized splat formation. *Surface & Coatings Technology*, 201, p 1373-1382.
55. Bahbou, M.F. and P. Nylen. (2007). On-line measurement of plasma-sprayed Ni-particles during impact on a Ti-surface: influence of surface oxidation. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(4), p 506-511.
56. McDonald, A., C. Moreau, and S. Chandra. (2007). Effect of substrate oxidation on spreading of plasma-sprayed nickel on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 202, p 23-33.
57. M. Mellali, P. Fauchais, A. Grimaud. (1996). Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/ cohesion of alumina coatings. *Surface and Coatings Technology*, 81, p 275-286
58. Fukumoto, M., I. Ohgitani, M. Shiiba, and T. Yasui. (2004). Effect of substrate surface change by heating on transition in flattening behavior of thermal sprayed particles. *Materials Transactions*, 45(6), p 1869-1873.
59. Li, C.J. and J.L. Li. (2003). Evaporated-gas-induced splashing model for splat formation during plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 184(1), p 13-23.
60. Planche, M.P., H. Liao, and C. Coddet. (2007). Oxidation control in atmospheric plasma spraying coating. *Surface and Coatings Technology*, 202, p 69-76.
61. Dykhuizen, R.C. (1994). Review of impact and solidification of molten thermal spray droplets. *Journal of Thermal Spray Technology*, 3(4), p 351-361.
62. Trapaga, G. and J. Szekely. (1991). Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 22(6), p 901-914.
63. Mostaghimi, J., S. Chandra, A. Fridman, Y.I.C. George, A. Greene, and A. Bar-Cohen. (2007). Heat transfer in plasma spray coating processes, in *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, p. 143-204
64. Bussmann, M., J. Mostaghimi, and S. Chandra. (1999). On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact. *Physics of Fluids*, 11, p 1406-1417.
65. Bussmann, M., S. Chandra, and J. Mostaghimi. (2000). Modeling the splashing of a droplet impacting a solid surface. *Physics of Fluids*, 12, p 3121-3132.

66. Mostaghimi, J., S. Chandra, R. Ghafouri-Azar, and A. Dolatabadi. (2003). Modeling Thermal Spray Coating Processes: a Powerful Tool in Design and Optimization. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, p 1-11.
67. Salimijazi, H.R., M. Raessi, J. Mostaghimi, and T.W. Coyle. (2007). Study of solidification behavior and splat morphology of vacuum plasma sprayed Ti alloy by computational modeling and experimental results. *Surface and Coatings Technology*, 201(18), p 7924-7931.
68. Xue, M., S. Chandra, J. Mostaghimi, and H.R. Salimijazi. (2007). Formation of pores in thermal spray coatings due to incomplete filling of crevices in patterned surfaces. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 27, p 647-657.
69. Harlow, F.H. and J.P. Shannon. (1967). The splash of a liquid drop *Journal of Applied Physics*, 38(10), p 3855-3866
70. Welch, J.E., F.H. Harlow, J.P. Shannon, and B.J. Daly. (1966). The MAC method, in LASL Report No. LA-3425: Los Alamos.
71. Jones, H. (1971). Cooling, freezing and substrate impact of droplets formed by rotary atomization. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, p 1657- 1660.
72. Fiedler, R. and J. Naber. (1989). Estimating Film Size due to Drop Impact. In Proceeding Combustion institute spring technical meeting on combustion fundamentals and applications..
73. Tsurutani, K., M. Yao, J. Senda, and H. Fujimoto. (1990). Numerical analysis of the deformation process of a droplet impinging upon a wall. *JSME Int. Ser 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermophysical properties*, 33(3), p 555-561.
74. Liu, H., E. Lavernia, and J. Rangel. (1993). Numerical simulation of substrate impact and freezing of droplets in plasma spray processes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26, p 1900-1908.
75. Kothe, D.B., R.C. Mjølness, and M.D. Torrey, RIPPLE. (1991). A computer program for incompressible flows with free surfaces in Technical Report LA-1200-MS, LANL.: Los Alamos, NM.
76. Zhao, Z., D. Poulidakos, and J. Fukai. (1996). Heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate-I. Modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39, p 2791-2802.
77. Attinger, D., Z. Zhao, and D. Poulidakos. (2000). An experimental study of molten microdroplet surface deposition and solidification: transient behavior and wetting angle dynamics. *Journal of Heat Transfer*, 122(3), p 544-556.
78. Haferi, S. and D. Poulidakos. (2002). Transport and solidification phenomena in molten microdroplet pileup. *Journal of Applied Physics*, 92, p 1675-1689.
79. Zheng, L.L. and H. Zhang. (2000). An adaptive level set method for moving-boundary problems: application to droplet spreading and solidification. *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals*, 37(4), p 437-454.
80. A. Abdellah El-Hadj, M. Zirari, N. Bacha. (2010). Numerical analysis of the effect of the gas temperature on splat formation during thermal spray process, *Applied Surface Science*, 257, p 1643–1648
81. H. Tabbara, S. Gu. (2012). Modelling of impingement phenomena for molten metallic droplets with low to high velocities, *Int. J. Heat. Mass. Transf*, 55, p 2081

82. Oukach S, Hamdi H, El Ganaoui M, Pateyron B. (2015). Numerical study of the spreading and solidification of a molten particle impacting onto a rigid substrate under plasma spraying conditions, *Thermal Science*, 19, p 277-284.
83. Zhang Y, Matthews S, Tran A T T and Hyland M. (2016). Effects of interfacial heat transfer, surface tension and contact angle on the formation of plasma-sprayed droplets through simulation study, *Surf. Coat. Technol*, 307, p 807-816
84. Zhang Y, Matthews S, and Hyland M. (2017). Modelling the spreading behaviour of plasma-sprayed nickel droplets under different impact conditions, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 50(27).
85. R.K. Shukla, A. Kumar, R. Kumar, D. Singh, A Kumar. (2019). Numerical study of pore formation in thermal spray coating process by investigating dynamics of air entrapment, *Surface & Coatings Technology*, 378.
86. Wang, G.-X. and E.F. Matthys. (1996). Modeling of nonequilibrium surface melting and resolidification for pure metals and binary alloys. *J. Heat Transfer*, 18(4), p 944-951.
87. C.H. Amon, K.S. Schmalz, R. Merz, and F.B. Prinz. (1996). Numerical and Experimental Investigation of Interface Bonding Via Substrate Remelting of an Impinging Molten Metal Droplet, *J. Heat Transf* , 118, p 164-172.
88. Wang SP, Wang GX, Matthys EF (1999) Deposition of a molten layer of high melting point material: substrate melting and solidification. *Mater Sci Eng A*, 262, p 25–32.
89. L.J. Zarzalejo, K.S. Schmalz, and C.H. Amon. (1999). Molten Droplet Solidification and Substrate Remelting in Microcasting Part I: Numerical Modeling and Experimental Verification, *Heat Mass Transf*, 34, p 477-485.
90. D. Attinger and D. Poulikakos. (2001). Melting and Resolidification of a Substrate Caused by Molten Microdroplet Impact, *J. Heat Transf*, 123, p 1110-1122.
91. Zhang H, Wang XY, Zheng LL, Jiang XY. (2001). Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying. *Int J Heat Mass Transf*, 44(24), p 4579–4592.
92. A.T.T. Tran, S. Brossard, M.M. Hyland, B.J. James, P. Munroe. (2009). Evidence of substrate melting of NiCr particles on stainless steel substrate by experimental observation and simulations, *Plasma Chem. Plasma Process*, 29, p 475-495.
93. M. Zhang, H. Zhang, L. Zheng. (2009). Numerical Investigation of Substrate Melting and Deformation During Thermal Spray Coating by SPH Method, *Plasma Chem Plasma Process*, 29, p 55–68
94. Rajesh K.S, Arvind K (2015) Substrate Melting and Re-solidification during Impact of High-Melting Point Droplet Material. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24, p 1368-1376.
95. Ramanuj V, Tong AY (2016) Simultaneous spreading and solidification of an impacting molten droplet with substrate remelting. *J Heat Transf*, 139(3), p 032301–032311
96. M. Driouche, T. Rezoug, and M. El Ganaoui. (2019). Numerical study of the melting and resolidification of the substrate during the impact of a ceramic droplet in a plasma spraying process, *Eur. Phys. J. Appl. Phys*, 88, p 20901
97. ANSYS FLUENT. 14.0, Theory guide, ANSYS, Inc., 2011.
98. Brackbill, J.U., D.B. Kothe, and C. Zemach. (1992). A continuum method for modelling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 100(2) p 335-354.

99. Prakash, C. and V. Voller. (1989). On the Numerical Solution of Continuum Mixture Model Equations Describing Binary Solid-Liquid Phase Change. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 15(2), p 171-189.
100. Y.Z. Zheng, Q. Li, Z.H. Zheng, J.F. Zhu, P.L. Cao. (2014). Modeling the impact, flattening and solidification of a molten droplet on a solid substrate during plasma spraying, *Applied Surface Science*, 317, p 526–533.
101. R.Rioboo. (2001). Impact de gouttes sur surfaces solides et sèches, thèse à l'université Paris6.
102. S.D. Aziz and S. Chandra. (2000). Impact, Recoil and Splashing of Molten Metal Droplets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43, p 2841-2857
103. Driouche M., Rezoug T., El-Ganaoui M. (2020) Effect of Droplet Initial Temperature on Substrate Melting and Its Re-solidification in Plasma Spray Process. In: Chaari F. et al. (eds) *Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, p 123-132.
104. C. Li, J. Li. (2004). Transient contact pressure during flattening of thermal spray droplet and its effect on splat formation, *J. Therm. Spray Techno*, 13(2), p 229–238
105. Shinoda K, Koseki T and Yoshida T. (2006). Influence of impact parameters of zirconia droplets on splat formation and morphology in plasma spraying, *J. Appl. Phys.*, **100**, 074903
106. Wei P, Wei Z, Li S, Tan C and Du J. (2014). Splat formation during plasma spraying for 8 mol% yttria-stabilized zirconia droplets impacting on stainless steel substrate, *Appl. Surf. Sci.*, 321, p 538-547
107. F.J. Hong and H.-H. Qiu. (2005). Modeling of Substrate Remelting, Flow, and Resolidification in Microcasting, *Numer. Heat Transf. A*, 48, p 987-1008