REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

THESE

Présentée

AU DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
FACULTE DES SCIENCES
UNIVERSITE DE BATNA

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR EN PHYSIQUE

Option : Physique des matériaux

Par

M^me^ Kriba Ilhem Rafika

Etude numérique de l'écrasement de particules fondues sur des substrats métalliques Application au procédé de projection thermique

---

Soutenue le : 2010

Devant la commission d'examen formée de :

Dr M. CHAHDI	**Pr.**	**Université de Batna**	**Président**
Dr A. DJEBAILI	**Pr.**	**Université de Batna**	**Rapporteur**
Dr S. GUESSASMA	**C.R.**	**I.N.R.A**	**Co-Encadreur**
Dr A. GASMI	**Pr.**	**Université d'Annaba**	**Examinateur**
Dr S. DJOUIMAA	**MC**	**Université de Batna**	**Examinateur**
Dr A. DOGHMANE	**Pr.**	**Université d'Annaba**	**Examinateur**
Dr A. BOUABELLOU	**Pr.**	**Université de Constantine**	**Examinateur**

Remerciements

Avant d'aborder l'exposé de ce travail, j'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur A. DJEBAILI qui a bien voulu m'accueillir dans son laboratoire et qui m'a accordé sa confiance pour la réalisation de ce travail. Qu'il me soit permis de lui témoigner ici ma sincère gratitude de l'expression de mon entier dévouement.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur A. CHAHDI pour l'honneur qu'il me fait de siéger à ce jury. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie Mme S. DJOUIMAA qui m'a fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur le Professeur A. GASMI et à Monsieur le Professeur A. DOGHMANE qui ont bien voulu accepter de participer à ce jury. Qu'ils soient assurés de toute ma reconnaissance.

Je tiens également à remercier Monsieur le Professeur A. BOUABLOU d'avoir consacré son précieux temps à examiner mon travail.

J'aimerais aussi saisir cette occasion pour remercier profondément le professeur BELCACEM BOUZIDA AISSA qui a contribué à la finalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont su me donner le goût du travail et de la persévérance et un soutien sans faille.

Mon cher mari qui m'a soutenu tout au lent de ce travail et à qui je dois tout amour, respect et fidélité.

Mon fils pour son amour continuel et sa patience en me voyant toujours occuper.

Mes frères et sœurs qui m'ont aidé tout au lent de ce travail et que j'aime tant.

Ceux et à celles qui m'ont aidé de près ou de loin afin de terminer ce travail.

Résume :

L'impact de gouttes sur surfaces solides ou liquides entre en jeu dans de nombreux processus tels que l'impression par jet d'encre, l´érosion due `a la pluie ou la combustion dans les moteurs. Malgré un intérêt théorique, expérimental et industriel vieux de plus d'un siècle, la dynamique d'impact et les différents régimes qui sont induit sont encore mal compris. Nous étudions la dynamique des lamelles, lors de l'impact de gouttes métallique et céramique sur une surface solide par simulation numérique des équations de Navier Stokes couplées aux équations de la thermique en tenant compte notamment de la conservation de la masse.

Mots clés : *Interface, impact, goutte, simulation.*

Abstract:

Droplet splashing and deposition occurs in many processes such as ink-jet printers, rain erosion or combustion. Although tremendous efforts have been devoted to this subject, the various regimes of impact are still poorly understood. We present here numerical simulations of the impact of a droplet on a thin solid layer; we will point out the formation of splats. Numerical simulation has been conducted by basically solving by Navier-Stokes equations coupled with the energy and mass conservation equations.

Key words: *Interface, impact, droplet, simulation.*

ملخص

إن الأثر الذي تخلفه قطرة على السطوح الصلبة أو السائلة يدخل في العديد من العمليات مثل الطباعة بنفث الحبر ، والتآكل بسبب المطر أو محركات الاحتراق.

على الرغم من أهميته النظرية ،التجريبية والصناعية لأكثر من قرن ، فان ديناميكية أثر القطرات و مختلف النظم الناتجة لا تزال غير مفهومة تماما.

سندرس ديناميكية الصفيحات أثناء سقوط قطرة معدن أوسيراميك على سطح صلب عن طريق المحاكاة الرقمية لمعادلات نافيي ستوكس مقرونة بمعادلات الحرارة مع مراعاة خاصة لحفظ الكتلة.

الكلمات الرئيسية: مواجهة، أثر، قطرة، ديناميكية الصفيحات

Table des matières

Introduction générale …….. **1**

Chapitre 1 Généralités sur le procédé de projection par plasma d'arc

Introduction ……... 4

1.1. Revêtements Céramiques…….. 4

1.2. Mode de mise en forme des céramiques……... 5

1.3. L'alumine ……. 5

1.4. Céramique projetée plasma……... 6

1.5. Projection par plasma d'arc soufflé (APS)…….. 8

1.5.1. Principe de fonctionnement d'une torche à plasma d'arc soufflé…… 8

1.5.2. Description de l'arc électrique créé et formation du jet plasma……... 9

1.5.3. Entraînement d'air dans un jet de plasma…… 12

1.5.4. La nature des gaz plasmagènes …… 13

1.5.5. Injection de la poudre …….. 13

1.5.6. Traitement des particules dans le jet plasma…… 16

1.6. Construction du dépôt …….. 17

1.6.1. Le substrat ……... 17

1.6.2. Empilement des lamelles ……. 19

1.6.3. Structure d'un dépôt……. 20

1.6.4. Contraintes au sein d'un dépôt……. 21

1.6.5. Adhérence du dépôt…….. 22

1.7. Conclusion…… 22

Chapitre 2 Comportement et hydrodynamique de l'impact de gouttes dans le procédé de projection par plasma d'arc

Introduction …….. 25

2.1. Comportement des particules fondues à l'impact ……..... 25

2.1.1. La Lamelle (splat)…… 25

2.1.2. Etalement de la particule ……. 26

2.1.3. La température de transition……. 27

2.1.4. Morphologie des particules écrasées…… 29
2.2. Hydrodynamique de l'impact de gouttes……... 30
2.2.1. Vitesse de l'écoulement…… 30
2.2.2. Tension de surface…… 31
2.2.3 Degré d'étalement maximal d'une goutte…… 33
2.2.4. Rugosité…… 36
2.2.5. Nombres adimensionnels……. 38
2.3. Echanges thermiques lors de l'impact …….. 39
2.4. Résistance thermique de contact …...……... 40
2.4.1. La résistance thermique de contact lors de l'impact d'une goutte……... 40
2.5. La solidification…….. ……. 42
2.6. Les modèles de formation des lamelles…… 44
1.7. Conclusion…… 50

Chapitre 3 Résolution numérique de l'impact de gouttes sur un substrat solide

Introduction……... 52
3.1. Les équations du problème : méthodes numériques……. 52
3.1.1. Méthodes numériques……...……... 52
3.1.2. Modèle à un fluide……...…… 53
3.1.3. Modélisation de la tension de surface……. 54
3.1.4. Modélisation du substrat…….. 56
3.2. Méthode numérique de l'équation d'advection…… 57
3.3. Equation de l'énergie…….. …… 58
3.4 Solidification …….. 59
3.5. Méthodes numériques de résolution ……... 59
3.6. Procédure numérique ……. 61
3.7. Stratégie de calcul……. 63
3.8. Conclusion…… 64

Chapitre 4 Résultats numériques de l'impact de gouttes sur un substrat solide

Introduction……... 66
4.1 Résultats de simulations numériques……. 66
4.2 Validation de l'impact de gouttes…… 66

4.3. La morphologie d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat…… 67
4.3.1. L'écrasement de la particule d'Alumine sur un plan horizontal……. 68
4.3.2. L'écrasement de la particule d'Alumine sur un plan incliné…….. 73
4.4 Impact simultané de gouttes, identiques……. 74
4.4.1. L'influence de la distance entre deux gouttes…….. 74
4.4.2. L'évolution du flux de chaleur à l'interface substrat-goutte…… 76
4.4.3. L'effet de la solidification…… 77
4.5. Impact marginal de deux gouttes successives d'Alumine……..... 78
4.6. Impacts consécutifs de deux gouttes identiques……..... 80
4.7. Simulation de l'impact d'un train de gouttes identiques…….. 82
4.7.1. La dynamique de formation de couches successives……... 84
4.7.2. L'influence de la fréquence d'impact……. 85
4.6. Conclusion…… 86

Chapitre 5 Conclusion et perspectives…….. 89

Bibliographie ……... 94

Liste des figures

Figure 1.1	Représentation schématiques des paramètres influents en projection thermique : exemple de la projection plasma…….	6
Figure 1.2	Schéma de principe de la projection par plasma d'arc……...	8
Figure 1.3	Coupe d'une torche à plasma en fonctionnement……..	9
Figure 1.4	Forces agissant sur le pied d'arc……	10
Figure 1.5	Représentation schématique du mode de claquage-réamorçage de l'arc...	11
Figure 1.6	Entraînement de l'air dans le plasma…….....	12
Figure 1.7	Influence du débit de gaz porteur sur la trajectoire moyenne des particules……	14
Figure 1.8	Schéma des particules en périphérie……..	15
Figure 1.9	Temps caractéristiques de la construction du dépôt……..	18
Figure 1.10	Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma….	20
Figure 2.1	Les différents modes d'impact……...	26
Figure 2.2	Mécanisme d'étalement des lamelles…….	27
Figure 2.3	Représentation schématique de l'étalement d'une goutte en fonction de la température du substrat Ts……	28
Figure 2.4	Schéma représentant la différence d'étalement avec la présence ou non D'adsorbats et de condensats…….	29

Figure 2.5	Morphologie de particules d'alumine projetées par plasma en fonction de leur vitesse et température avant impact……	29
Figure 2.6.a	Liquide mouillant……....	31
Figure 2.6.b	Liquide non mouillant…….	31
Figure 2.7	Schéma d'étalement d'une goutte…….…….	33
Figure 2.8	Influence de la rugosité sur l'étalement des lamelles…….	37
Figure 2.9	Illustration du contact d'une goutte et d'un substrat rugueux…….	41
Figure 3.1	Les méthodes de représentation des interfaces……..	57
Figure 4.1	Domaine de calacul et les regions goutte-interface-substrat…….	67
Figure 4.2	L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine Ecrasée sur un substrat initialement à 300°k avec une vitesse de 150m/s.	68
Figure 4.3	Evolution des champs de pression d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k……..	69
Figure 4.4	L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k (200m/s)……	70
Figure 4.5	L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k (250m/s)……..	71
Figure 4.6	L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine Ecrasée sur un substrat initialement à 500°k (200m/s) ……..	72
Figure 4.7	L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat incliné de 60° initialement à 300°k……	73

Figure 4.8 Influence de la distance entre deux gouttes d'Alumine écrasées Sur un substrat initialement à300°k (200m/s) …… 75

Figure 4.9 Evolution des températures à l'interface et au point de rencontre Lors de l'impact de gouttes simultanées …… 77

Figure 4.10 L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine lors De l'impact marginal de deux gouttes identiques sur un substrat ……. 78 Initialement à 300°k (200m/s).

Figure 4.11 Evolution des températures dans la 1iere lamelle d'Alumine ……... 79

Figure 4.12 L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine lors De l'impact consécutif de deux gouttes identiques sur un ……. 81 substrat Initialement à 300°k (200m/s) avec un intervalle de temps dt.

Figure 4.13 L'évolution du champ de température de l'impact d'un train de gouttes Identiques lors de l'impact consécutif sur un substrat initialement……... 83 À 300°k (200m/s) avec un intervalle de temps dt

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Temps caractéristiques de la formation d'un dépôt par projection plasma 19

Tableau 4.1 Paramètres physiques de l'Alumine…..……... 68

Nomenclature

Tt	température de transition	K°
E_{ci}	énergie cinétique d'impact	J
ξ_m	degré d'étalement maximum	-
C_p	chaleur spécifique	J/kg.K
D	diamètre de la particule étalée	(m)
F_{TS}	tension superficielle	N/m
h	épaisseur de la lamelle	µm
h	l'enthalpie	
k	conductivité thermique	W/m.K
Ø	flux de chaleur	W/m^2
R_{th}	résistance thermique de contact	$W/m^2.K$
S	paramètre d'étalement	-
te	temps nécessaire à l'étalement de la goutte	µs
T_f	température de fusion	K°
Tg	température du bas de la goutte	K°
T_p	température de la particule	K°
Ts	température du substrat	K°
v_0	vitesse d'impact	m/s
W	travail nécessaire pour déformer la goutte	J
α	diffusivité thermique	M^2/s
δ	fonction Dirac	-
ΔH_f	chaleur latente de fusion	J/kg
θ	angle de contact	°
κ	courbure totale de l'interface	-
μ	viscosité dynamique	Pa.s
ρ	masse volumique	kg/m^3
σ	tension superficielle.	J/m^2
Ep	énergie potentielle	J
t	temps	s
R_e	nombre de Reynolds	-
W_e	nombre de Weber	-

P_e	nombre de Peclet	-
Oh	nombre d’Ohnesorge	-
K	nombre de Sommerfeld	-
St	nombre de Stéfan	-

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1

Généralités sur le procédé de projection par plasma d'arc

Introduction Générale

Dans la course actuelle aux procédés ayant le meilleur rapport qualité prix, les dépôts épais ont désormais un rôle clef parmi les nombreux candidats en lice. Afin d'améliorer les caractéristiques des dépôts et leur applicabilité dans les conditions extrêmes, les dépôts cermets à base de métal et les dépôts céramiques de propriétés spécifiques ont été développés.

Parallèlement, la progression des connaissances sur les matériaux ainsi que sur les procédés de fabrication des revêtements est actuellement très rapide. Parmi les procédés connus, la projection thermique est sans contestation l'une des techniques les plus appréciées.

La projection plasma fait partie de la projection thermique qui regroupe un ensemble de procédés dans lesquels des matériaux sous forme pulvérulente (particules de taille inférieure à 100μm, environ) sont déposés dans un état fondu ou semi-fondu sur des substrats préalablement préparés [1]. Introduit en 1909 par Dr. Schoop, la projection thermique s'est développée en premier temps d'une façon empirique et coûteuse limitant son usage aux domaines aérospatial, nucléaire et militaire. Au cours du temps, les progrès, grâce à la recherche fondamentale et appliquée, ont amélioré la qualité et la reproductibilité du dépôt, tout en diminuant le coût de production. Ces progrès ont permit d'élargir les applications de procédés plasma qui s'étendent actuellement aux domaines automobile, énergie, outillage, etc.… Cependant, les résultats ne sont pas encore tout à fait satisfaisants et l'élargissement des applications demande une meilleure compréhension des phénomènes intervenant au cours du dépôt, de façon à améliorer la qualité et la fiabilité des couches projetés.

Globalement, l'étude thermique d'un processus de projection peut être divisée en deux parties :

1- la première s'intéresse aux échanges plasma -particules avant impact sur le substrat.
2- la seconde étudie l'impact, le refroidissement des lamelles résultantes et la construction du dépôt.

La communauté scientifique a jusqu'à présent orienté ses recherches vers l'étude du jet plasma [2], des phénomènes à la sortie de la torche tel que l'entraînement de l'air, en relation avec les propriétés du jet et le comportement physico-chimique des particules [3,4].

D'autres travaux ont concerné les propriétés des particules en vol et leur impact sur le substrat [5,6] ainsi que des travaux expérimentales sur l'étalement et l'empilement des splats [7,8,9]. Cependant les matériaux les plus souvent étudiés sont les métaux et peu d'investigations ont été menées sur les revêtements céramiques et cermets.

La projection thermique à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique (APS) est l'un des procédés qui comptabilise le plus grand nombre de paramètres opératoires. L'optimisation des conditions d'élaboration d'un dépôt avec un tel procédé requiert donc la compréhension la plus complète possible des corrélations qui existent entre les paramètres, les propriétés en service et les caractéristiques structurales des dépôts [10].

La qualité d'un dépôt obtenu par projection thermique à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique (APS) dépend fortement de l'histoire thermique des particules en vol avant impact [11]. Les enjeux que représentent la modélisation de ce type de procédé résident dans la possibilité de prédire l'impact des paramètres opératoires sur les propriétés et les caractéristiques des dépôts, de proposer des combinaisons pour optimiser le coût de réalisation des dépôts et de solutionner les écarts dus à la variabilité du procédé et contrôler ainsi sa stabilité. Pour cela l'intérêt d'une modélisation fine de transferts d'énergies, de quantités de mouvement et du transfert de masse lors de l'interaction plasma -particules et l'impact des particules en fusion est clairement affiché par la communauté scientifique travaillant dans ce domaine.

Ce mémoire, tout en utilisant les donnés issues des travaux précédents, complète les connaissances en direction des dépôts céramiques. Notre démarche a pour objectif la compréhension des mécanismes intervenant lors de l'impact des particules fondues sur un substrat de façon à contrôler les propriétés des dépôts par simulation numérique.

Le premier chapitre de ce mémoire met à la disposition du lecteur les éléments bibliographiques relatifs aux principaux thèmes abordés. Elle commence par un rappel concernant la projection thermique en générale puis le principe de la projection plasma pour

aboutir à la compréhension des principaux paramètres influents la déposition d'une goutte de céramique sur un substrat solide.

Le deuxième chapitre présente l'hydrodynamique de l'impact d'une goutte sur un substrat solide et la nature des phénomènes entrant en jeu lors de l'impact et l'écrasement des particules fondues et leur déposition avec une revue bibliographique concernant les principaux modèles analytiques et numériques de l'impact de gouttes dans le processus de la projection plasma, à l'échelle des particules fluides et les équations utilisées pour simuler les phénomènes dynamiques et thermiques qui y interviennent. .

Le troisième chapitre est consacré à la description du modèle physique utilisé pour simuler l'impact de gouttes en général puis les principales méthodes de résolution numériques utilisées pour résoudre ce type d'équation présentées dans la littérature y compris celle utilisée dans ce travail.

Le chapitre IV rassemble les résultats de la simulation numérique de l'impact et de l'étalement des particules d'Alumine et la formation des lamelles sur le substrat qui font l'objet de notre travail de thèse

Finalement, le chapitre V propose une conclusion générale sur notre travail de simulation numérique puis des recommandations pour le futur sont formulées en vue d'améliorer les résultats obtenus.

Introduction

Ce chapitre présente les points nécessaires à la compréhension du travail réalisé lors de la préparation de ce mémoire. Il aborde les fondements et les principes de la projection thermique, spécialement la projection thermique à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique (APS), ainsi que les mécanismes et les phénomènes intervenant lors de la projection des particules céramiques ou/et métalliques sur un substrat solide.

1.1. Revêtements Céramiques

Dans le but d'améliorer la résistance à la corrosion, à l'usure ou comme barrière thermique, on utilise des revêtements constitués d'une mince couche céramique déposée, en général, sur substrats métalliques, ou céramiques. Entres autres avantages on peut ainsi :

1- Conférer les propriétés spécifiques des céramiques à des pièces métalliques de formes complexes.

2- Diminuer les coûts de fabrication par rapport à ce qu'ils seraient si la pièce était réalisée uniquement en céramique.

3- Rendre ces revêtements compétitifs (à propriétés égales de la pièce technique) par rapport aux alternatifs matériaux classiques.

1.2. Mode de mise en forme des céramiques

Les céramiques peuvent être utilisées pour constituer des pièces massives. Cependant, ces pièces ont un coût de production élevé et sont très fragiles. Ceci explique le développement, depuis ces vingt dernières années, des techniques de dépôt de céramiques sur les matériaux. Les principaux procédés industriels actuellement développés et utilisés pour élaborer les revêtements céramiques sont : les procédés de dépôt physique en phase vapeur (PVD) classiques et ablation laser, les procédés de dépôt chimique en phase vapeur (CVD), l'oxydation d'un substrat métallique par chauffage sous air... Le choix d'un procédé dépend

de nombreux facteurs comme la nature du substrat, l'épaisseur du dépôt souhaité ou le type de propriétés de surface recherchées [12].

La projection thermique est le seul procédé qui permet de réaliser rapidement des dépôts épais (jusqu'à des épaisseurs millimétriques), sur de grandes surfaces et pour un coût acceptable. Les applications industrielles majeures concernent les industries aéronautique, navale, automobile, biomédicale, mécanique.

1.3. L'alumine

Une bonne tenue mécanique aux températures élevées, une grande résistivité électrique, une dureté élevée, une résistance à l'usure et une inertie chimique importante font de l'alumine un matériau utilisé dans des domaines très variés [13].

Les revêtements d'alumine font l'objet de nombreuses applications industrielles, notamment en tant que : revêtement anti-usure, gaine de protection dans des capteurs de température, couche diélectrique dans les ozoneurs, couche protectrice dans les cellules solaires, membrane dans les détecteurs de gaz.

Les dépôts céramiques oxydes Al_2O_3 et Cr_2O_3 sont très résistants à l'usure .Elaborés par projection thermique, les dépôts de ces matériaux cependant possèdent plusieurs types de défauts (transformation de phase, porosité, fissures etc….) réduisant leur application tribologique [14]. Les phases secondaires de céramiques comme TiO_2 et ZrO_2 ou /et de métal comme Cu, Ni ou Cr ont parfois été ajoutées dans les dépôts d'alumine. L'addition de ces phases améliore à la fois la résistance à la rupture et la résistance au frottement. En projection thermique, le TiO_2 est souvent associé à Al_2O_3 afin d'améliorer la tenue mécanique (notamment la tenue aux chocs thermiques) et l'adhérence du dépôt [15].

1.4. Céramique projetée plasma

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur pour fondre et accélérer un matériau celui-ci prend alors la forme de particules pâteuses ou liquides qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilements successifs.

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux (Figure 1.1), relatifs principalement à :

La nature du matériau à projeter,

La source de chaleur,

L'atmosphère environnante,

Le substrat [15].

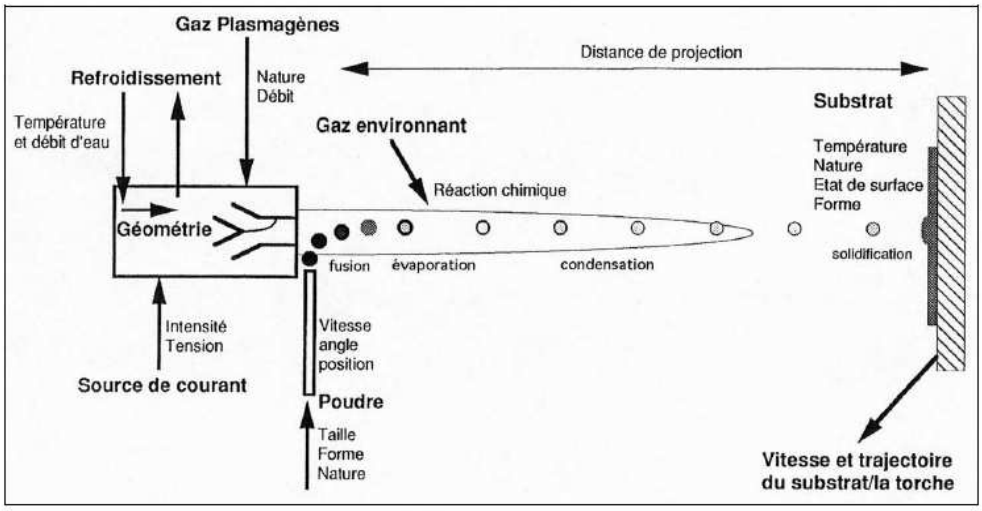


Figure 1.1 : Représentation schématiques des paramètres influents en projection thermique : Exemple de la projection plasma.

Le matériau projeté doit pouvoir fondre sans se décomposer (la différence entre la température de fusion et la température de décomposition ou même de sublimation doit être supérieure ou égale à 200°C). Il est introduit dans la source de chaleur sous forme de fil, de poudre ou encore de fil creux garnis de poudre. La source de chaleur doit pouvoir fournir

suffisamment de chaleur au matériau pour qu'il puisse atteindre la fusion (transfert thermique) et produire un jet gazeux capable de transporter les particules jusqu'au substrat (transfert cinétique). En effet, ces transferts régissent l'étalement et la solidification des particules, qui influencent considérablement les propriétés du dépôt.

Depuis le début du XXème siècle, la projection thermique n'a cessé de se développer en utilisant différentes sources de chaleur afin de toujours mieux chauffer et accélérer les particules :

− Projection à l'arc électrique (1911), qui utilise un arc électrique entre deux électrodes sous formes de fils consommables comme source de chaleur pour fondre le matériau. Celui ci, réduit à l'état de gouttelettes, est pulvérisé sur le substrat par un jet d'air comprimé. Ce procédé de projection est simple et économique mais limité aux matériaux conducteurs; le récent développement des fils fourrés céramiques tend à y remédier.

− Projection plasma (1951) sous air, sous faible pression de gaz inerte (1975), sous haute pression de gaz inerte (1991);

− Projection au canon à détonation (1955). Elle utilise le même principe que la projection à flamme mais dans ce cas, la combustion est discontinue se produit dans le fût d'un canon à l'aide d'une bougie qui enflamme un mélange acétylène - oxygène. La poudre à projeter est chauffée par cette explosion (les gaz peuvent atteindre 4000°C) et entraînée par l'onde de choc (de vitesse avoisinant 3000 m.s-1) ;

− Projection à flamme rapide (HVOF : « High Velocity Oxy Fuel ») (1983), qui utilise comme source de chaleur une combustion continue et sous pression et permettant d'atteindre des vitesses de gaz de 1800 à 2200 m.s-1 et des températures de 2500 à 2800°C ;

− Projection supersonique à froid (« Cold Spray ») qui n'est pas réellement un procédé de projection thermique puisqu'il s'effectue « à froid » mais lui est tout de même assimilée. Cette technique très récente est encore en développement et consiste à utiliser un jet de gaz chaud à haute pression (20 à 35 bars) pour projeter une poudre, généralement métallique préchauffée. Cependant, seuls les procédés permettant d'atteindre des températures et des vitesses élevées de particules peuvent faire fondre les matériaux à température de fusion très élevée.

1.5. Projection par plasma d'arc soufflé (APS)

Pendant longtemps, les dépôts ont été élaborés de manière empirique à défaut de disposer d'outils de diagnostic et de modèles théoriques pour atteindre une bonne compréhension du procédé. Toute la difficulté réside dans le nombre de paramètres opératoires à contrôler. Chacun de ces paramètres influe sur les propriétés finales du dépôt à différents stades de son élaboration. Pour comprendre leurs influences, le procédé plasma est généralement subdivisé en 3 zones distinctes : (a) la formation du jet de plasma et l'injection des particules, (b) le traitement thermocinétique des particules en vol et (c) l'étalement des particules sur le substrat et la construction du dépôt (figure 1.2).

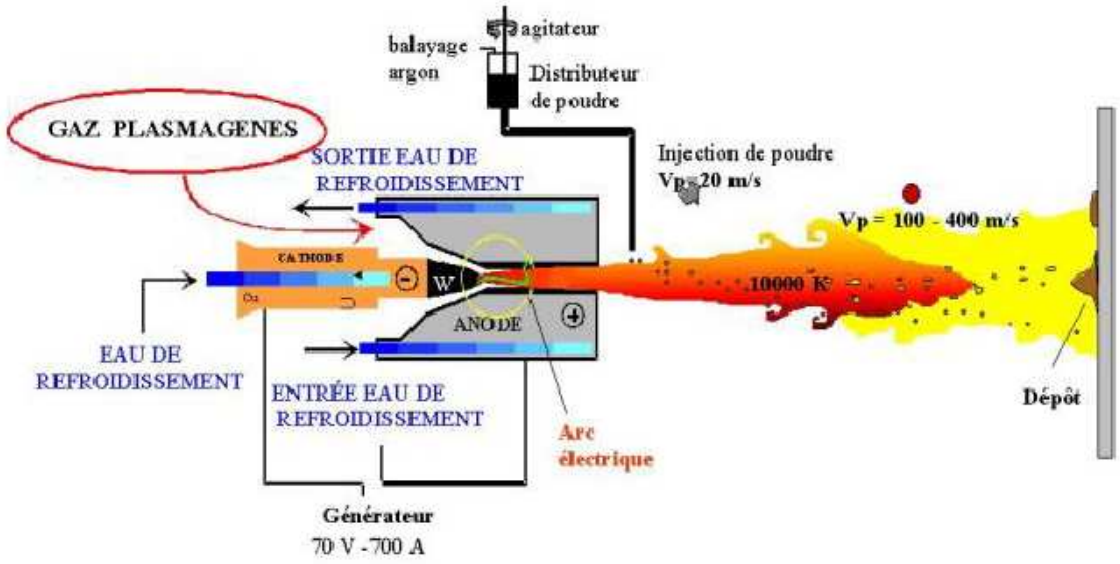


Figure 1.2 : Schéma de principe de la projection par plasma d'arc.

1.5.1. Principe de fonctionnement d'une torche à plasma d'arc soufflé

Le principe de fonctionnement de la torche est le suivant : un arc électrique éclate entre une cathode et une anode, qui sert à la fois de tuyère, les gaz plasmagènes injectés en amont sont chauffés par effet Joule et partiellement ionisés et créent ainsi un plasma qui suit le sens

de l'écoulement. Ce plasma présente, selon les conditions expérimentales, des températures supérieures à 10000K, une densité faible et des vitesses subsoniques pouvant dépasser 2000 m/s en sortie de tuyère.

1.5.2. Description de l'arc électrique créé et formation du jet plasma

Les torches de projection les plus classiques sont constituées d'une cathode à extrémité conique en tungstène thorié (2 % de thorine en masse) et d'une anode cylindrique en cuivre électrolytique, éventuellement avec un insert en tungstène. Afin d'évacuer la grande quantité de chaleur fournie par l'arc à la surface des électrodes (essentiellement à l'anode), celles-ci sont refroidies par une circulation d'eau sous pression. On fait démarrer la torche en faisant claquer une décharge électrique haute tension (5-10 kV) et haute fréquence (quelques MHz) entre la pointe de la cathode et l'anode. L'arc électrique se maintient ensuite en continu, sous faible tension et fort courant, et selon le développement représenté sur la Figure 1.3.

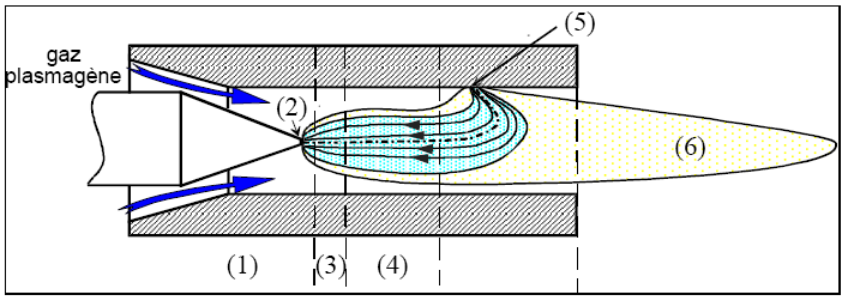


Figure 1.3 : Coupe d'une torche à plasma en fonctionnement.

Si on se réfère à la figure I.3, on peut distinguer différentes zones de l'arc: La zone (1) correspond à l'injection du gaz plasmagène froid. La zone (2) est la tache cathodique, située à la pointe de la cathode, d'une surface de l'ordre de quelques dixièmes de mm2, qui est le lieu d'émission des électrons nécessaires au fonctionnement de l'arc électrique. Pour disposer de densités de courant élevées, il faut avoir une température T élevée, ce qui implique d'utiliser

un matériau réfractaire comme le tungstène. Les températures atteintes dépassent 3800K, cette zone est donc en fusion. La zone (3) est la zone de développement de la colonne d'arc. L'expansion de la colonne d'arc dépend du mode d'injection du gaz plasmagène et de la géométrie de la cathode. La zone (4) est la colonne d'arc développée. La turbulence se développe et favorise le mélange entre le gaz froid et le plasma, elle crée des perturbations qui déstabilisent la colonne et permettent un accrochage ponctuel en (5). La zone (5) est la zone d'accrochage anodique qui permet de boucler le circuit électrique. La zone (6) est l'écoulement du plasma en extinction qui va former le jet en sortie de tuyère.

Dans la tuyère, la colonne d'arc est délimitée par une enveloppe isotherme (T>7000 K) à l'intérieur de laquelle la conductivité électrique des gaz est suffisamment élevée pour permettre le passage du courant. La température minimum nécessaire pour que le courant passe dépend de la nature du gaz plasmagène utilisé.

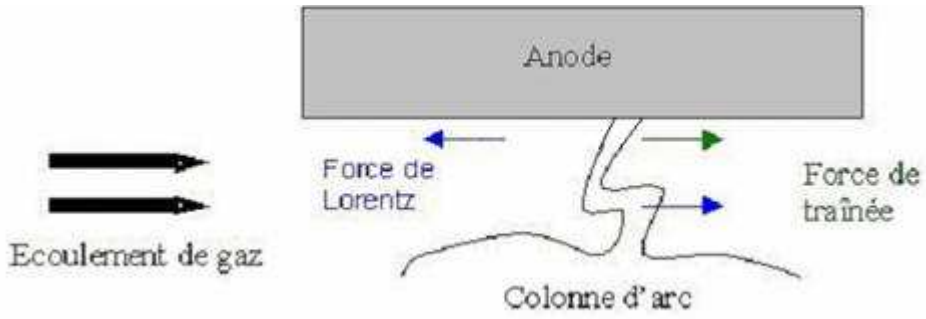


Figure 1.4 : Forces agissant sur le pied d'arc

La « boucle » de plasma qui relie la colonne d'arc à la paroi anodique, est soumise à des forces dynamiques liées à l'écoulement de gaz, aux forces électromagnétiques de Lorentz dues à l'interaction entre le courant d'arc et le champ magnétique induit par ce courant, et à des effets thermiques (figure 1.4). Lorsque le gaz plasmagène contient un gaz binaire et que le courant d'arc est suffisamment élevé (> 200 A), la compétition entre ces phénomènes induit généralement un allongement progressif de la longueur de l'arc et une augmentation de la tension jusqu'au claquage de l'arc puis au réaccrochage à un autre point de l'anode (figure

1.5). Ce mouvement, nécessaire pour limiter l'usure de la tuyère, est essentiellement régi par la géométrie de la chambre d'arc et des électrodes, le débit massique des gaz plasmagènes, leur composition et leur mode d'injection dans la chambre d'arc, l'intensité du courant d'arc et l'état de surface de la paroi de la tuyère [13].

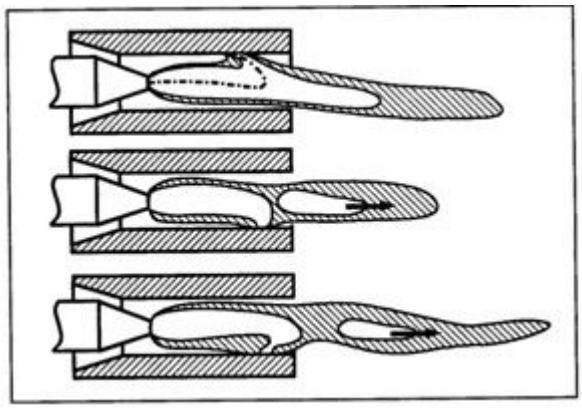


Figure 1.5 : Représentation schématique du mode de claquage-réamorçage de l'arc

Le déplacement continuel du pied d'arc sur la paroi de l'anode confère un caractère «aléatoire» au procédé de projection plasma: lorsque le point d'accrochage se déplace vers l'aval, la longueur de la colonne d'arc augmente ainsi que l'enthalpie et la vitesse du gaz, et ce jusqu'au réaccrochage en un autre point. Ces variations entraînent des fluctuations temporelles et spatiales des champs de vitesse et de température du jet de plasma en sortie de tuyère.

1.5.3. Entraînement d'air dans un jet de plasma

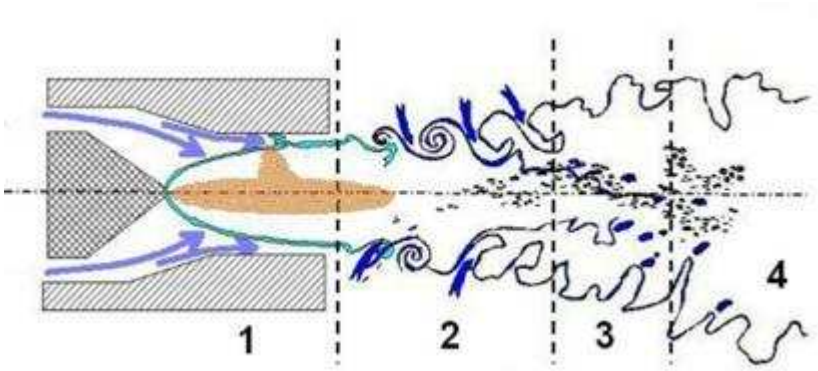


Figure 1.6 : Entraînement de l'air dans le plasma

La figure 1.6 montre une représentation schématique de l'écoulement du jet de plasma dans l'atmosphère. Le jet de plasma formé dans la chambre d'arc (zone 1) sort de la torche à grande vitesse (500 à 2500 m/s) et pénètre dans le gaz ambiant au repos. La rencontre de ces deux gaz de vitesses et densités différentes (la densité du gaz à 10000 K est environ 1/50i^{ème} de celle du gaz à 300 K) entraîne la formation de tourbillons d'instabilité en périphérie du jet (zone 2). Ces tourbillons grossissent vers l'aval et l'écoulement devient turbulent. Ils entraînent le gaz ambiant sous forme de bulles qui gardent, dans un premier temps, une masse volumique et une inertie supérieure à celle du gaz plasmagène. Ces bulles se cassent dans le jet en structures de plus en plus petites et augmentent le caractère turbulent au sein de l'écoulement (zone 3). Lorsque ces turbulences atteignent l'axe du jet, celui-ci perd son caractère laminaire. Il devient alors pleinement turbulent et l'entraînement croissant du gaz ambiant contribue à réduire sa vitesse et son enthalpie (zone 4). L'amplitude de ce phénomène dépend des caractéristiques du jet (en particulier de sa masse volumique et de sa vitesse) mais aussi des fluctuations du pied d'arc qui modifient continuellement ces caractéristiques et le développement de la turbulence [16].

1.5.4. La nature des gaz plasmagènes

La nature des gaz plasmagènes influe directement sur les traitements thermiques et cinétiques des particules. Le choix de ces gaz dépend de la température et de la difficulté de fusion ainsi que de la densité de la matière à projeter. Les gaz les plus couramment employés sont l'argon, le diazote, le dihydrogène, l'hélium et l'oxygène. L'utilisation d'argon est courante car ce gaz lourd confère au gaz plasmagène une quantité de mouvement plus importante que les autres gaz : il pousse le pied d'arc et accélère les particules. L'apport de dihydrogène dans le mélange permet d'accroître la conductivité thermique du plasma et donc d'améliorer le transfert de chaleur plasma-particules. L'utilisation d'hélium accroît la conductivité thermique, ce qui retarde le refroidissement du plasma par diffusion des inclusions d'air. Le choix du mélange plasmagène est donc l'objet d'un compromis entre transfert cinétique et transfert thermique plasma-particules. Il est déterminant pour une bonne fusion et accélération des particules [17]. Il a également une influence sur le déplacement du pied d'arc à l'anode. L'ajout d'un gaz de masse élevée (Ar ou N2) possédant une quantité de mouvement suffisante pour accroître les forces de traînée qui repoussent l'arc en aval de la tuyère ce qui permet de limiter l'érosion de l'anode et d'augmenter sa durée de fonctionnement [18].

Les céramiques, matériaux à hauts points de fusion, nécessitent des plasmas plus énergétiques. L'hydrogène est habituellement utilisé comme gaz secondaire en mélange avec l'argon, dans des proportions pouvant atteindre 25 % en volume car sa viscosité (μ_{10000K} = 3,1 kg/m.s) et sa conductivité thermique (k_{10000K} = 3,7 W/m.K), dans la gamme de température des plasmas, permettent de meilleurs transferts thermiques.

1.5.5. Injection de la poudre

Les matériaux utilisés pour la projection plasma d'arc soufflé se présentent généralement sous forme de fines particules (dont le diamètre peut varier de 5 à 110 µm environ) de granulométrie plus ou moins serrée. L'introduction de ces particules dans l'écoulement plasma se fait au niveau de la sortie de tuyère, au moyen d'un injecteur dans lequel circule un gaz porteur dense (généralement de l'argon). Pour limiter la dispersion des particules dans le

jet, l'injecteur possède un faible diamètre interne (de 1,2 à 2 mm). Les paramètres d'injection contrôlent : à la fois la trajectoire, l'accélération et le traitement thermique des particules au sein du jet plasma et le rendement du dépôt [19].

Le traitement thermique des particules au sein du jet plasma est effectué grâce aux transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le plasma et les particules solide. Le transfert de quantité de mouvement fixe à la fois la vitesse et le temps de séjour des particules au cœur du plasma, tandis que l'échange de chaleur gouverne l'état final (fondu ou non) des particules avant l'impact. Ces mécanismes de transfert sont déterminés grâce à la fois aux propriétés thermo-physiques des gaz plasmagènes (viscosité, conductivités thermique et électrique, densité massique…) à la température et vitesse du jet plasma qui sont eux meme influencées par les fluctuations du pied d'arc.

Du fait des variations radiales et temporelles des propriétés qui caractérisent le jet plasma, les échanges plasma-particules sont optimaux au niveau de la zone centrale du jet qui est la plus chaude et la plus rapide. Les particules doivent donc rester un maximum de temps dans cette zone, pour qu'elles soient mieux traitées, avec comme résultat un meilleur rendement de dépôt.

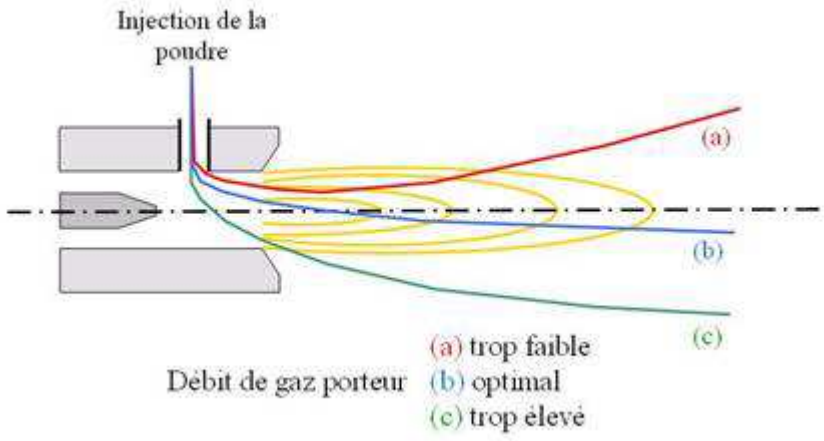


Figure 1.7 : Influence du débit de gaz porteur sur la trajectoire moyenne des particules

Comme le montre la Figure 1.7, pour un plasma sans fluctuations, quand le débit est trop faible, les particules ne pénètrent pas dans le jet plasma et sont éjectées. Quand le débit est trop important, les particules traversent le jet plasma et ne sont pas traitées. La trajectoire optimale des particules correspond à un angle de 3-4 degrés par rapport à l'axe de la torche (trajectoire b) [15]. Le rôle du gaz porteur est donc de conférer aux particules une quantité de mouvement suffisante pour pénétrer dans le plasma. Les vitesses moyennes des particules sont quasi-indépendantes de leur taille en sortie d'injecteur mais, du fait des turbulences, les plus petites particules, en particulier celles dont la masse spécifique est faible, entrent en collision avec les parois créant ainsi un jet d'autant plus divergent en sortie d'injecteur qu'elles ont des tailles inférieures à 20 µm.

Par ailleurs, la vitesse d'injection des particules doit être ajustée en fonction de la quantité de mouvement qui leur est impartie par le plasma dans le but d'avoir le maximum de particules restant le plus longtemps possible au cœur du jet plasma. En effet, le problème majeur pour injecter les poudres dans le jet est de vaincre l'opposition du plasma à leur pénétration qui est due à la quantité de mouvement imposée par plasma aux particules. Ces dernières doivent donc acquérir dans l'injecteur une quantité de mouvement suffisante et adaptée à leur granulométrie. Si cette quantité de mouvement est trop faible, les particules suivent les zones froides périphériques du plasma et ne sont que partiellement fondues à leur arrivée sur le substrat (figure 1.8). De même, si cette quantité de mouvement est trop importante, les particules traversent le jet plasma et sont, là encore, mal chauffées. Les débits massiques des gaz plasmagènes et porteur, ainsi que la puissance dissipée, doivent donc être optimisés afin que les particules soient injectées au cœur du jet.

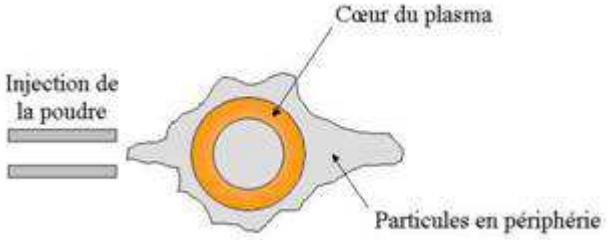


Figure 1.8 : Schéma des particules en périphérie

1.5.6. Traitement des particules dans le jet plasma

Le traitement des particules est conditionné par les transferts de quantité de mouvement, de chaleur et de masse entre le plasma et les particules. Ces transferts dépendent des champs de température et de vitesse de l'écoulement, de la nature du mélange de gaz ainsi que de l'état des couches limites cinématique et thermique qui se forment autour de la particule [18]. L'accélération et le chauffage des particules dépendent :

a)- de leur nature, de leur taille granulométrique et de leur forme ;

b)- de leur trajectoire qui est influencée par le type d'injection de poudre, la position de l'injecteur, l'angle d'injection et débit de gaz porteur ;

c)- de l'écoulement plasma qui dépend de la géométrie des électrodes, la nature et le débit des gaz plasmagènes et la puissance électrique.

Les petites particules sont plus facilement accélérées et cette accélération est améliorée quand leur trajectoire est proche du cœur du jet plasma (zone où la vitesse du plasma est très supérieure à celle des particules). Cependant, elles ralentissent plus fortement que les grosses avant impact.

L'engouffrement d'air dans le plasma, ainsi que la phase d'injection sont des mécanismes induisant une large dispersion des trajectoires des particules dans le jet et donc une importante disparité de leur traitement thermique. Dès leur injection, les particules les plus grosses traversent le jet plasma et se retrouvent rapidement sur le bord inférieur. Durant leur court temps de séjour à travers le cœur du plasma, elles sont au mieux juste fondues en surface et la plupart ne sont pas traitées. Ceci s'explique par le fait que plus une particule est grosse, plus sa capacité thermique est élevée et plus elle a besoin de temps pour être traitée. Dans le cas des particules massives partiellement fondues en surface, elles se refroidissent et commencent à se solidifier rapidement après avoir quitté le cœur du plasma.

Les petites particules ont tendance à moins pénétrer dans le plasma, mais elles sont chauffées plus facilement et plus rapidement. Dès que leur température de surface approche de la température d'ébullition, elles commencent à s'évaporer très rapidement, surtout pour celles ayant une faible conductivité thermique. La fraction de matière vaporisée peut être

supérieure à 20%, réduisant ainsi le diamètre de la particule. Les petites particules peuvent donc arriver sur le substrat soit partiellement soit totalement évaporées en fonction de leur taille et de leur trajectoire. Dans le cas de particules métalliques, ces vapeurs peuvent se recondenser dans le dépôt sous forme d'oxydes.

En conclusion, les transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le plasma et la poudre déterminent les propriétés des particules (vitesse et température) au moment de l'impact. Or, du fait des larges granulométries de poudre utilisées, de l'optimisation plus ou moins réussie de l'injection et des instabilités du jet de plasma, le traitement thermique et cinétique de la poudre peut présenter, au cours d'une même projection, des disparités spatiales et temporelles importantes [19]. Ceci explique en partie les comportements très différents des particules lors de la phase d'écrasement : les plus grosses n'arrivent pas complètement fondues sur le substrat, tandis que les plus fines peuvent être entièrement vaporisées, ce qui accroît ainsi la porosité.

Un bon transfert thermique est capital pour obtenir des dépôts offrant de bonnes qualités (densité, rigidité,…). En effet, les particules, pour s'écraser et accommoder toutes les irrégularités de la surface (en particulier pour réduire la porosité), doivent être fondues à l'impact avec des vitesses élevées (si possible > 300 m/s). C'est pourquoi, les plasmas contenant de l'hydrogène sont intéressants, car du fait de leur importante conductivité thermique dès 4000 K, ils améliorent grandement le transfert thermique.

1.6. Construction du dépôt

1.6.1. Le substrat

L'état physico- chimique de la surface du substrat à revêtir joue un rôle très important sur la structure finale du dépôt sur son adhérence. Les techniques de préparation de la surface doivent permettre de nettoyer les matériaux et de modifier leur état géométrique de surface. Ceci impose de réaliser une série d'opérations dans un ordre bien établi [1]:

1- un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passivant et des graisses. Elle a pour conséquence la destruction et l'élimination de la plupart des impuretés généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements ;

2- un sablage qui permet la création d'un état de surface rugueux afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser un bon accrochage mécanique.

La rugosité du substrat est obtenue par sablage de la surface et sa valeur est essentiellement fonction de la taille de l'abrasif (généralement de l'Alumine). Il est important que la hauteur des aspérités soit adaptée à la taille des lamelles formées. Un sablage trop long ou avec un abrasif usagé peut être préjudiciable à l'adhésion en raison de l'incrustation de résidus de sablage.

D'un point de vue microscopique, un dépôt plasma est constitué de l'empilement de lamelles issues de l'étalement et de la solidification des particules de poudre fondues et accélérées par le plasma. L'étalement et la solidification d'une particule s'effectuent indépendamment des autres : la particule sur laquelle impacte une nouvelle est généralement solidifiée. La durée séparant l'impact de lamelles au même endroit sur le substrat est de l'ordre de 10µs, soit environ plus de dix fois le temps de solidification d'une lamelle (fig.1.9). Cet empilement confère aux dépôts une structure lamellaire particulière anisotrope et hétérogène de lamelles individuelles.

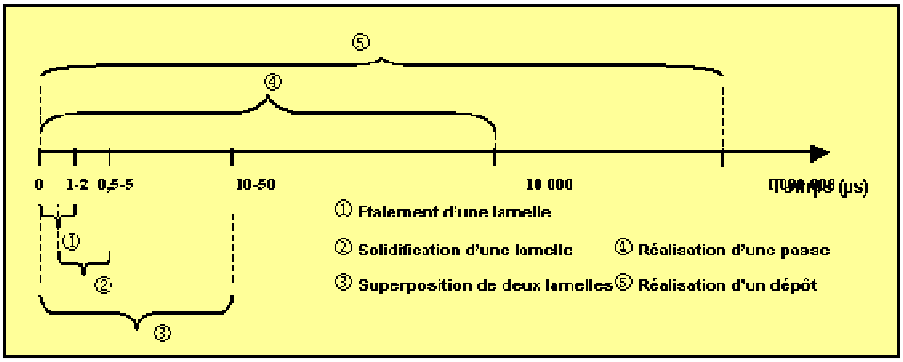


Figure 1.9: Temps caractéristiques de la construction du dépôt [20]

Macroscopiquement, la construction du dépôt est conditionnée par les déplacements combinés de la torche (translation) et du substrat (rotation, par exemple). Le revêtement est ainsi constitué d'un certain nombre de passes (une passe est effectuée lors d'une demi-période du déplacement de la torche). Chaque passe est le résultat de la juxtaposition et du recouvrement plus ou moins important de cordons (couche formée par les lamelles) [21]. Donc le processus de dépôt présente trois étapes caractéristiques, de durées différentes (Tableau 1.1):

- La première est la formation d'une lamelle écrasée.

-La deuxième est la formation d'une couche constituée par empilement de lamelles écrasées.

- La troisième est le surchappement des couches pour former une passe. Elle correspond au temps entre deux passages successifs de la torche au même endroit. La couche précédente, ou passe, a généralement le temps de se refroidir avant d'être réchauffée (par l'écrasement de la particule suivante au même endroit).

Formation d'une lamelle (étalement et solidification)	$t_s < 10$ µs
Temps entre 2 impacts successifs au même endroit	$T_l \sim 10$ µs à 100 µs
Temps entre 2 passages de torche au même endroit ou temps entre 2 passes successives pour de petites pièces	$T_p \sim$ 0,1 s à quelques s

Tableau 1.1 : Temps caractéristiques de la formation d'un dépôt par projection plasma [21]

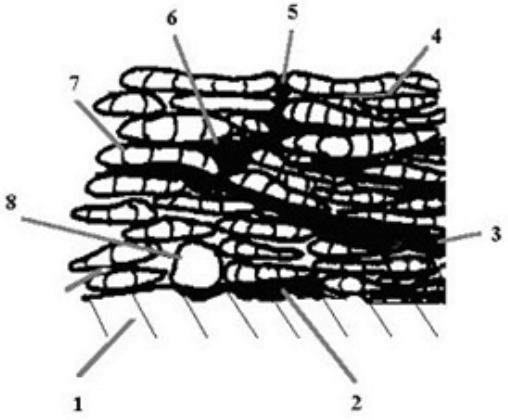
1.6.2. Empilement des lamelles

La formation d'une couche dépend étroitement du temps entre deux impacts successifs. Après l'impact d'une goutte sur le substrat, la lamelle résultante subit un refroidissement très rapide (quelques microsecondes) à une température inférieure à sa température de fusion. Ce refroidissement est suivi d'un réchauffage périodique dû à l'arrivée des particules suivantes.

Cette « chaleur d'impact » diminue rapidement quand la lamelle est recouverte par une autre, en particulier lorsque le matériau, les constituant, a une mauvaise conductivité thermique [22]. Quand la couche est construite, sa température diminue rapidement si la couche est fine (quelques µm), tandis que si elle est épaisse (environ supérieure à 30 splats en fonction des propriétés thermiques), un gradient thermique important se développe, surtout pour les matériaux mauvais conducteurs thermique, engendrant une variation dans la structure du dépôt en fonction de son épaisseur, ainsi que des contraintes résiduelles pouvant entrainer des fissurations en particulier dans le cas des céramiques.

1.6.3. Structure d'un dépôt

La réalisation d'un dépôt par projection plasma se caractérise par une structure lamellaire présentant de nombreux défauts (Figure 1.10). Cette structure, composée de particules plus ou moins bien fondues, contient essentiellement des porosités, des fissurations inter-lamellaires (macrofissuration), des fissures intralamellaires (microfissuration), des aires de contact plus ou moins parfaites au niveau des liaisons lamelle-lamelle et lamelle-substrat.



1-substrat, 2-défaut d'adhérence à l'interface, 3-macrofissures parallèles à la surface dues aux contraintes thermiques, 4-microfissures interlamellaires, 5-macrofissures perpendiculaires à la surface, 6-porosité ouverte, 7-microfissures interlamellaires dues aux contraintes de trempe, 8-particule infondue.

Figure 1.10 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma [21]

La porosité intrinsèque des dépôts est pour la plupart du temps due à un mauvais contact des lamelles avec le substrat ou entre-elles, un mauvais chevauchement de celles-ci, une

mauvaise fusion et un mauvais étalement des particules. La présence de cette porosité, ainsi que des fissures, influe énormément sur les propriétés mécaniques et thermiques du dépôt. Elle peut être en partie réduite si les particules, à l'impact, sont bien fondues et ayant une vitesse d'impact entre 200 et 350 m/s en générale) [23].

1.6.4. Contraintes au sein d'un dépôt

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, des micro et macrofissures se forment au cœur d'un dépôt réalisé par projection plasma. Ces dernières ont pour origine l'apparition successive de différentes contraintes au sein du dépôt et / ou du substrat. Le contrôle de ces contraintes est extrêmement important pour l'obtention de dépôts denses.

Les principales contraintes dans un dépôt sont [23] :

1- Des contraintes mécaniques induites par le sablage des pièces avant projection afin de les rendre rugueuses. Le sablage engendre des contraintes en compression sous la surface du substrat (sur une épaisseur de quelques dixièmes de millimètres) qui augmentent avec la taille des particules de sablage, la pression, et la durée du sablage.

2- Des contraintes de trempe lors du refroidissement rapide des splats. Elles dépendent des caractéristiques des particules qui s'écrasent sur le substrat et de la température de ce dernier. Elles sont toujours en tension et induites dans chaque lamelle individuellement.

3- Des contraintes thermiques proviennent, lors du refroidissement de l'ensemble substrat-dépôt depuis la température de projection jusqu'à la température ambiante.

4- Les contraintes résiduelles sont égales à la somme de toutes ces contraintes, elles sont souvent principalement dues à la contribution thermique qui est pratiquement toujours proportionnelle à la chute finale de température. Pour les céramiques, elles se relaxent par micro fissuration perpendiculairement aux splats et macro-fissuration perpendiculaire ou parallèle (ou les deux) au substrat.

1.6.5. Adhérence du dépôt

L'adhérence des lamelles sur substrat lisse est d'excellente qualité lorsqu'un composé intermédiaire se forme à l'interface ou que la structure cristalline s'adapte. Dans le cas des dépôts élaborés par projection plasma, l'adhérence est générée essentiellement par deux types de liaisons :

• Accrochage mécanique,

• Liaison chimique,

L'accrochage mécanique est le principal mécanisme qui engendre l'adhésion des lamelles sur le substrat. Cependant le préchauffage du substrat améliore le contact entre la lamelle et la surface.

1.7. Conclusion

Un dépôt, en projection plasma, a une structure lamellaire caractéristique. Il est construit par impacts successifs de particules dans un état fondu ou semi-fondu formant des lamelles écrasées (ou splats) se chevauchant. La particule suivante se dépose généralement une fois que la particule précédente est déjà solidifiée. Par leur étalement après impact, les particules fondues remplissent, tout d'abord, les rugosités du substrat permettant une adhésion et une cohésion mécanique des dépôts. La solidification des lamelles entraîne un accrochage généralement mécanique.

L'étalement des gouttes liquide après impact sur un substrat lisse ou rugueux, avec en général un début de solidification avant que l'étalement ne s'achève, dépend de deux types de paramètres : ceux qui sont liés à la particule projetée : sa taille, sa température, son état de fusion et d'oxydation, ses propriétés physiques, sa vitesse à l'impact ; et ceux liés au substrat

Les propriétés thermo-mécaniques de ces dépôts dépendent à la fois des conditions de séjour des particules dans le plasma (température, vitesse et trajectoire), ainsi que de leur étalement, puis de la solidification et du refroidissement des lamelles écrasées.

Il est donc nécessaire de comprendre et d'étudier l'influence des différents paramètres mis en jeu lors de la formation d'une lamelle, aussi d'identifier ceux les plus influents sur la formation de la lamelle afin d'établir des corrélations entre ces paramètres et la microstructure du dépôt.

Chapitre 2

Comportement et hydrodynamique de l'impact de gouttes dans le procédé de projection par plasma d’arc

Introduction

L'impact de gouttes sur une surface solide ou liquide avec changement de phase est un problème que l'on rencontre dans un grand nombre d'applications, et suscite un intérêt grandissant dans la recherche en mécanique des fluides. Toutes les utilisations ont pour objectif commun de recouvrir une surface par un matériau avec un minimum de matière et une faible épaisseur régulière, afin d'en assurer l'isolation, de meilleures propriétés ou simplement l'esthétique du produit final. Cela nécessite une reproductibilité fiable du recouvrement de matière sur la surface concernée, en optimisant au mieux les paramètres du processus de fabrication.

Afin de comprendre la morphologie du revêtement, il est intéressant d'examiner les phénomènes dynamiques et thermiques à l'échelle des gouttes qui vont créer la fine couche. Les phénomènes qui gouvernent l'impact de gouttes, les échanges thermiques entre la particule fluide chaude et le substrat froid, et la solidification sont complexes et interviennent dans la même échelle de temps. Chacun de ces aspects sera présenté séparément afin de mieux distinguer leur influence sur l'impact et l'étalement des gouttes.

2.1. Comportement des particules fondues à l’impact

2.1.1. La Lamelle (splat) :

La formation d’un seul splat dépend de nombreux paramètres qui ne sont pas encore aujourd’hui entièrement compris, tels que les paramètres de la particule à l’impact : taille, température, état de fusion, état d’oxydation, vitesse, angle d’impact,… et la surface du substrat : état d’oxydation, rugosités micrométriques et nanométriques, température et propriétés thermiques. Le processus de formation des splats détermine à la fois les caractéristiques microstructurales (phases cristallines, taille des cristallites) et macroscopiques (porosité et adhésion) du dépôt.

Dès que la goutte de matière arrive sur le substrat (dans les 100 premières ns), trois modes d'impact sont possibles : le rebond, le dépôt et le « splashing » d'impact (éjection gouttelettes de matière, de quelques centaines de nanomètres, qui sont en grande majorité entraînées par l'écoulement, défini aussi par le terme éclaboussure) comme l'illustre la Figure (2.1). Les gouttelettes issues du splashing sont éjectées à quelques millimètres de la surface du dépôt. Réentrainées par le gaz, elles ne perturbent quasiment pas le dépôt.

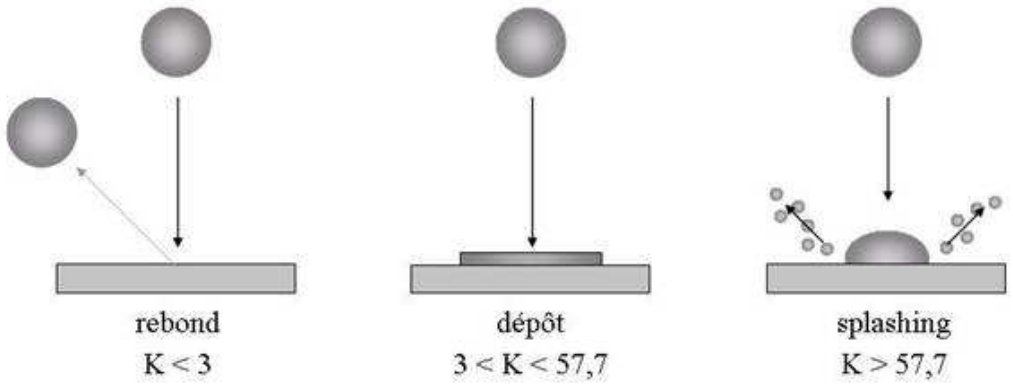


Figure 2.1: Les différents modes d'impact

Ces impacts sont caractérisés par le facteur de Sommerfeld, K, qui dépend des paramètres de la goutte à l'impact et qui sera détaillé aux paragraphes suivants.

2.1.2. Etalement de la particule

Une fois que la particule a percuté le substrat, elle continue à se déformer et à s'étaler. En effet lorsqu'une particule vient impacter sur un substrat, elle s'étale grâce à sa pression interne pour former une lamelle. L'énergie cinétique de la particule en vol est transformée en travail de déformation visqueuse puis en énergie de surface. L'étalement est alors contrôlé par des phénomènes mécaniques et thermiques.

Sur un substrat lisse, cet étalement peut être décomposé en trois étapes (qui peuvent être dépendantes) : une phase très courte, de quelques nanosecondes, correspondant à l'impact initial avec le plus souvent le phénomène de splashing, une deuxième phase de l'ordre de la microseconde correspondant à l'étalement de la particule avec ou sans éclaboussures (flattening, splashing) et une troisième de quelques microsecondes correspondant au refroidissement de la lamelle comme le montre la Figure (2.2). La solidification de la lamelle commence généralement avant que son étalement soit complètement terminé.

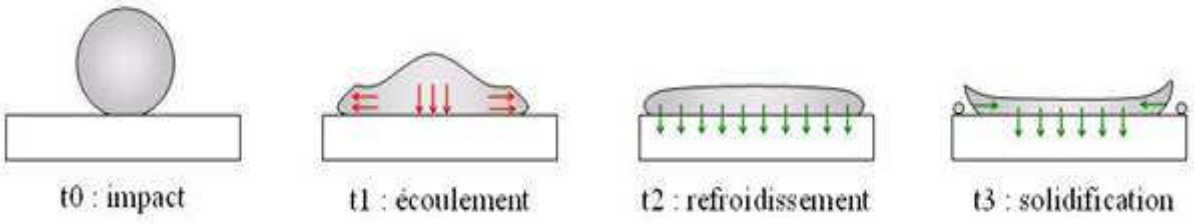


Figure 2.2 : Mécanisme d'étalement des lamelles

2.1.3. La température de transition

L'étalement des particules dépend fortement de la température du substrat (Ts). Il a été montré que, pour une particule impactant perpendiculairement sur un substrat lisse, les splats obtenus ont une forme distordue si la température du substrat est inférieure à une température critique (Tt : température de transition), alors qu'ils ont une forme de disque parfaite si la température du substrat est supérieure à Tt (Figure 2.3). Pour l'alumine sur de l'acier, cette température est de l'ordre de 200 à 250 °C.

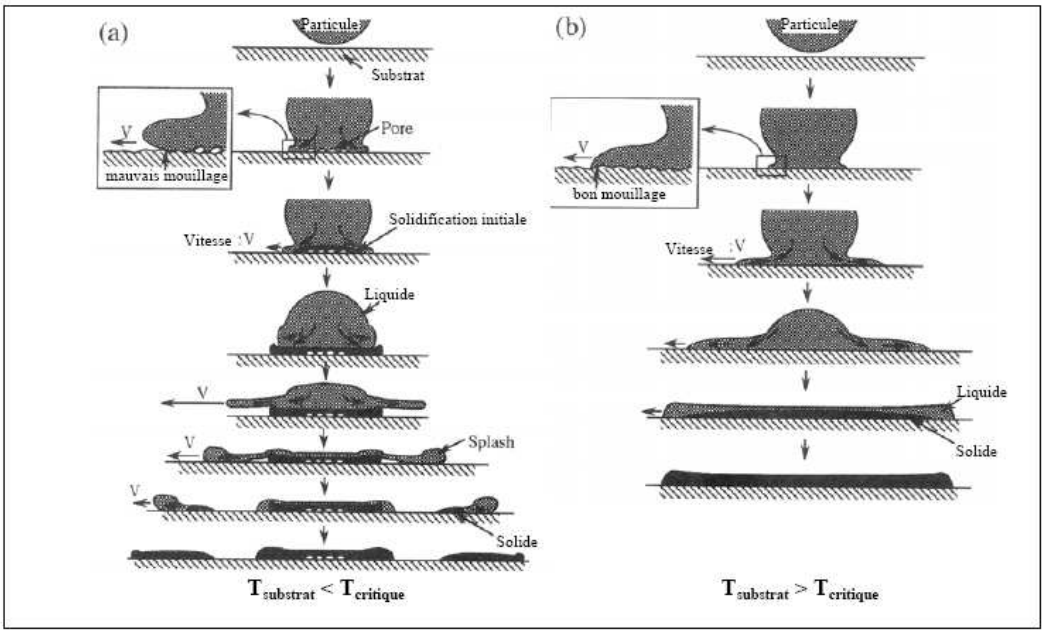


Figure 2.3 : Représentation schématique de l'étalement d'une goutte en fonction De la température du substrat Ts [24].

Dans le cas où le substrat a une température inférieure à la température de transition, la partie centrale du splat se solidifie en premier et rapidement à cause de la grande différence de température entre le substrat et le splat. Puis, la partie entourant le centre ne se solidifie qu'après le phénomène de splashing. D'où la forme déchiquetée des splats. De plus pour une température de substrat supérieure à la température de transition, l'adhésion / cohésion du dépôt est 2 à 3 fois supérieure à celle obtenue sur des substrats froids [25,26].

Différentes explications ont été proposées sur l'origine de cette température de préchauffage. Les deux plus probables sont que Tt est la température pour laquelle les absorbats et les condensats à la surface du substrat sont éliminés. Ainsi le préchauffage entraînerait une légère oxydation superficielle (pour les substrats métalliques) et une désorption de molécules comme l'eau qui amélioreraient le mouillage du substrat par le matériau liquide (figure 2.4).

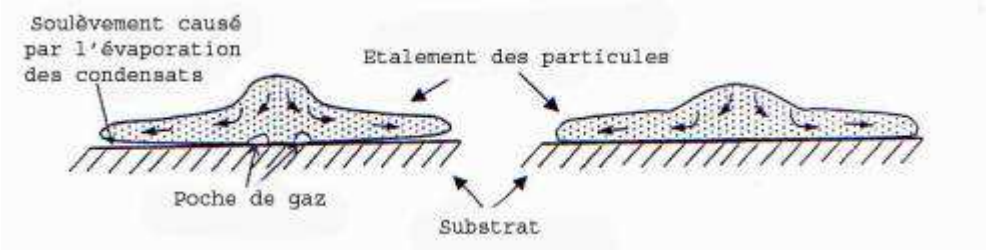


Figure 2.4 : Schéma représentant la différence d'étalement avec la présence ou non d'adsorbats et de condensats

2.1.4. Morphologie des particules écrasées

Beaucoup d'études traitent de l'évolution de la morphologie des lamelles en fonction des paramètres de projection, les vitesses et températures des particules au moment de l'impact, la nature et la température du substrat. Ils ont présenté un classement qualitatif de 30 morphologies différentes de particules étalées en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact (Figure 2.5).

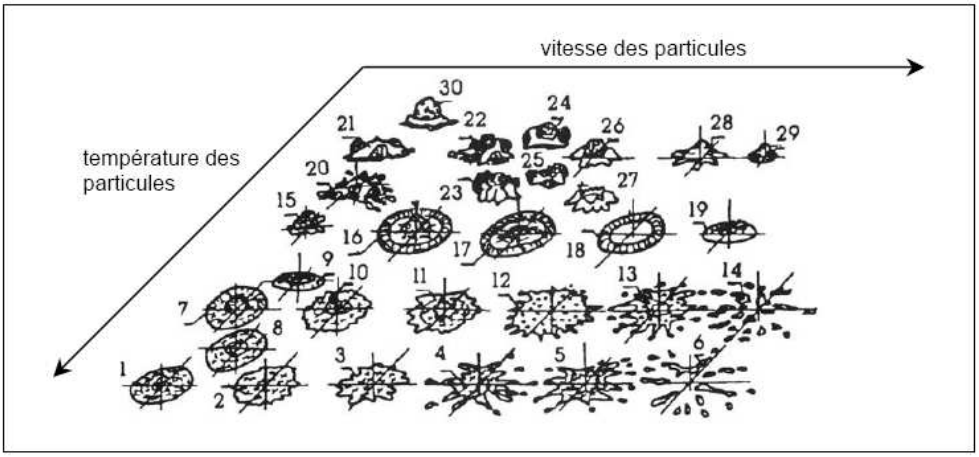


Figure 2.5 : Morphologie de particules d'alumine projetées par plasma en fonction de leur vitesse et température avant impact [24].

Une gouttelette correctement fondue s'étalerait correctement avec une vitesse faible (ex : cas 1) mais éclaterait au moment de l'impact sous l'action des forces de surface avec une vitesse élevée (ex : cas 6). Une particule avec une température faible ne serait fondue que partiellement (cas 30) les échanges plasma / particule n'ont pas été pour elles suffisants pour qu'elles puissent atteindre le substrat à l'état fondu. Le noyau solide resterait piégé au centre de la lamelle ou éjecté conduisant à une lamelle de forme annulaire (cas 17). Un bon mouillage du substrat par le liquide ou une viscosité élevée du liquide diminuerait ce phénomène d'éclatement. En outre, une interface de mauvaise qualité (occlusions gazeuses, rugosité, oxydation superficielle du substrat) réduirait la surface de contact lamelle/substrat, augmenterait le temps de refroidissement et donc favoriserait l'éclatement. Une lamelle de type « crêpe » aurait alors un bon contact avec le substrat et se serait solidifiée avant l'éjection de gouttelettes de matière.

2.2. Hydrodynamique de l'impact de gouttes

2.2.1. Vitesse de l'écoulement

Dans la plupart des cas réels, la vitesse de projection de la goutte sur la surface (liquide ou solide) est très élevée. C'est le cas par exemple de l'APS, l'intervalle de temps entre l'impact et la fin de l'étalement est donc très court. L'écoulement de la goutte est lié à un champ de vitesses qui évolue de façon importante au cours du temps. Lors de l'impact, cette vitesse change subitement de direction. Son intensité agit donc directement sur la nature de l'écoulement de la goutte. Cela se traduit, initialement, en terme d'énergie cinétique d'impact:

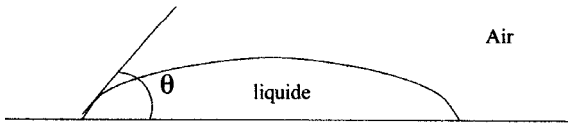
$$E_{ci} = \frac{1}{2} m_g V_i^2 \qquad (2.1)$$

Tout au long de l'écoulement, jusqu'à stabilisation du système, cette énergie évolue par conversion en d'autres types d'énergies jusqu'à dissipation totale de l'énergie cinétique afin d'atteindre l'état stable.

2.2.2. Tension de surface

Avant l'impact, le fluide reste sous l'état de goutte unique, sans se disperser dans le fluide ambiant pourvu que sa taille soit compatible. Lorsqu'une goutte est en contact avec un substrat, elle se déforme et perd son aspect sphérique, en s'étalant plus ou moins largement sur le substrat. L'énergie de surface n'est plus répartie de façon homogène. Mais la tension de surface entre en compétition avec la tension interfaciale entre le substrat et la goutte, et la tension interfaciale entre le substrat et l'air ambiant. Cette compétition est à l'origine du phénomène de mouillage, c'est-à-dire la faculté que possède la goutte à recouvrir le substrat: les tensions superficielles goutte -substrat et air-substrat minimisent chacune la surface de contact entre les milieux mis en jeu. La façon dont la goutte s'étale dépend donc de la nature du substrat. Lorsque le liquide est mouillant, l'étalement de la goutte est important.

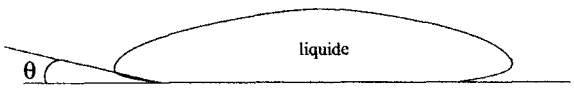
Liquide mouillant ;



Substrat

Figure 2.6.a : Liquide mouillant

Liquide non mouillant :



Substrat

Figure 2.6.b : Liquide non mouillant

θ est l'angle de contact qui est fonction des énergies de surface de chaque milieu.
A l'équilibre, l'angle de contact statique θ peut prendre des valeurs comprises entre 0° et 180°

selon la nature de la goutte, du milieu ambiant et du substrat. Dans les cas extrêmes et peu réalistes, à θ=- 0°, la goutte s'étale infiniment, ce qui correspond à la formation d'un film de fluide. Dans le cas θ = 180°, la goutte est en contact avec le substrat en un seul point. La goutte est donc sphérique et ne mouille pas du tout le substrat. Dans le cas réel, ce concept d'angle de contact se retrouve en dynamique et se situe entre ces deux cas extrêmes. Dans la plupart des modèles numériques, la valeur de l'angle de contact provient directement de valeurs expérimentales [27].

Afin de déterminer si une goutte va s'étaler sur un substrat ou non, il faut considérer le paramètre d'étalement S (de l'anglais « spreading ») qui correspond à la différence d'énergie entre substrat sec et mouillé :

$$S = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma) \tag{2.2}$$

Avec γ_{SG} la tension superficielle solide/gaz, γ_{SL} la tension superficielle solide/liquide, et γ la tension superficielle γ_{LG} entre le liquide et le gaz. Si S est positif, le liquide s'étale complètement sur le substrat pour former un film; on est en situation de mouillage total. Par contre, si S est négatif, alors la goutte ne s'étale pas et elle forme un angle de contact θ avec le substrat. L'expression de l'angle de contact statique d'une goutte liquide déposée sur un substrat solide, en équilibre avec une phase vapeur est donnée par :

$$\gamma \cos\theta_e = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \tag{2.3}$$

Le paramètre d'étalement *S* peut se réécrire :

$$S = \gamma(\cos\theta_e - 1) \tag{2.4}$$

Ainsi l'angle de contact θ ne peut être défini que si S est négatif, l'angle de contact ne dépend que des différentes tensions superficielles entre liquide, gaz et solide :

$$\cos\theta_e = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma} \tag{2.5}$$

Généralement, pour une modélisation des phénomènes interfaciaux, on préfère faire intervenir les énergies de surface plutôt que l'angle de contact.

2.2.3. Le degré d'étalement maximal d'une goutte

En se plaçant dans le cas où l'impact génère une déposition, on peut évaluer le degré d'étalement maximum de la goutte par voie analytique, en se basant sur la conservation des énergies. L'hypothèse principale provient du modèle d'étalement suggéré. La goutte initialement sphérique s'étale le long du substrat sous forme d'un disque d'épaisseur constante sans prendre en compte la présence du bourrelet périphérique (figure 2.7).

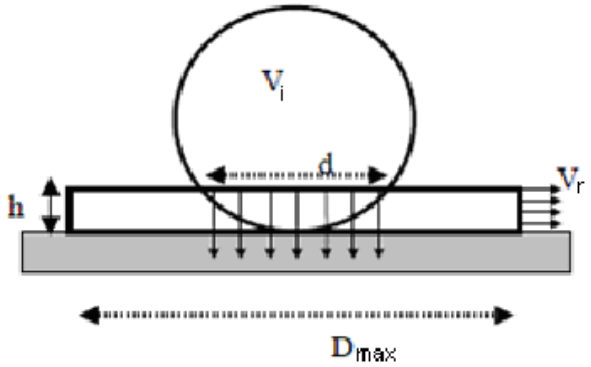


Figure 2.7 : Schéma d'étalement d'une goutte [23]

Avant impact, on considère que la goutte est à son minimum d'énergie potentielle

(Soit Ep = 0). Les énergies cinétiques et de surface de la goutte sont respectivement :

$$E_{c1} = \left(\frac{\pi}{6} D_i^3\right)\left(\frac{1}{2}\rho V_i^2\right) \qquad (2.6-a) \qquad , \quad E_{S1} = \sigma\pi D_i^2 \qquad (2.6-b)$$

Lorsque la goutte atteint son maximum d'étalement, son énergie cinétique est nulle ($E_{c2} = 0$), Son énergie de surface est la contribution des énergies entre d'une part la goutte et l'air et d'autre part la goutte et le substrat :

$$E_{S2} = \sigma_{LS}\pi\frac{D_{max}^2}{4} + \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4} - \sigma_{SG}\pi\frac{D_{max}^2}{4} \qquad (2.7)$$

Le dernier terme de cette équation correspond à l'énergie de surface entre le substrat et l'air

qu'il faut enlever au système afin de conserver toutes les énergies de surface, puisque cette interface est remplacée par le contact entre la goutte et le substrat. Or, selon la loi d'Young qui relie les tensions superficielles à l'angle de contact:

$$\cos\theta_a = \frac{\sigma_{SG}-\sigma_{SL}}{\sigma} \qquad (2.8)$$

En combinant les deux expressions précédentes:

$$E_{S2} = \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4} - \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4}\cos(\theta_a) \qquad (2.9)$$

Finalement:

$$E_{S2} = \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4}(1-\cos(\theta_a)) \qquad (2.10)$$

Le travail nécessaire pour déformer la goutte contre les effets de viscosité s'écrit sous la forme:

$$W = \iint_{0\ \Omega}^{t_c} \Omega\, d\Omega dt \approx \emptyset\Omega t_c \qquad (2.11)$$

Où Ω est le volume de fluide visqueux, *te* le temps nécessaire à l'étalement de la goutte et **Ø** la fonction de dissipation visqueuse. L'ordre de grandeur de cette dernière est estimé par:

$$\emptyset \approx \mu\left(\frac{V_i}{L}\right)^2 \qquad (2.12)$$

Où μ *est* la viscosité de la goutte et L une longueur caractéristique normale à la direction de l'étalement qui est supposé se rapporter à l'épaisseur de splat *h.*

Le temps d'étalement $\mathbf{t_e}$, quant à lui, est estimé grâce à l'hypothèse d'étalement sous forme de cylindre de diamètre **D** et épaisseur h qu'il faut au préalable déterminer.

En considérant la configuration donnée par la figure 2.7, la conservation des débits permet d'affirmer que:

$$V_i\,\pi\frac{d^2}{4} = V_r\,Dh \qquad (2.13)$$

A l'instant de l'étalement maximal, le diamètre du splat atteint D_{max}- Par conservation de la masse:

$$\pi\frac{D_i^3}{6} = \pi\frac{D_{max}^2}{4}h \qquad (2.14)$$

Soit :

$$h = \frac{2D_i^3}{3D_{imax}^2}h \qquad (2.15)$$

Le diamètre d varie lorsque la goutte s'étale, de 0 (début du contact avec le substrat) jusqu'à D_i. Afin d'écarter le caractère évolutif de d, on lui assigne une valeur moyenne de $d = D_i/2$.

$$V_r = \frac{dR}{dt} = \frac{1}{2}\frac{dD}{dt} \qquad (2.16)$$

Et donc :

$$\frac{dD}{dt} = 2V_r = 2V_i\pi\frac{D_i^2}{16}\frac{1}{D}\frac{3D_{max}^2}{2D_i^2} \qquad (2.17)$$

Soit : $$\frac{dD}{dt} = V_i\pi\frac{3}{16}\frac{D_{max}^2}{D}\frac{1}{D} \qquad (2.18)$$

Par intégration, sachant qu'à t=0 , D=0 on obtient :

$$D(t) = \sqrt{\frac{3}{8}\frac{V_i}{D_i}D_{max}^2\,t} \qquad (2.19)$$

En faisant apparaître le temps adimensionné par rapport à la vitesse d'impact t*

On obtient finalement :

$$\frac{D(t)}{D_{max}} = \sqrt{\frac{3}{8}t^*} \qquad (2.20)$$

Lorsque le diamètre atteint D_{max} , le temps correspondant est de :

$$t_c = \frac{8}{3}\frac{D_i}{V_i} \quad (2.21)$$

A présent que $L = \delta$, t_c *et* $\Omega = \pi D_{max}^2 \ \delta/4$ (2.22)

sont déterminés, on peut évaluer W :

$$W = \frac{\pi}{3}\rho D_i V_i^2 D_{max}^2 \frac{1}{\sqrt{R_e}} \quad (2.23)$$

Finalement, par conservation des énergies: $E_{c1} + E_{s1} = E_{c2} + E_{s2} + W$ (2.24)

Ce qui, en combinant avec leurs expressions respectives amène à :

$$\frac{D_{max}}{D_i} = \sqrt{\frac{W_e+12}{3(1-\cos\theta_a)+4\left(\frac{W_e}{\sqrt{R_e}}\right)}} \quad (2.25)$$

Le terme (1-cos0$_a$) qui correspond à l'influence de l'angle de contact est compris entre 0 et 2. Ainsi, si $\left(\frac{W_e}{\sqrt{R_e}}\right) \gg 2$, ce qui se traduit par $W_e \gg \sqrt{R_e}$, les effets capillaires peuvent être négligés. Si de plus $W_e \gg 12$, la formule précédente peut se ramené à :

$$\xi_{max} = \frac{D_{max}}{D_i} = \frac{1}{2}R_e^{1/4} \quad (2.26)$$

2.2.4. Rugosité

La rugosité exprime l'état de surface du substrat, et correspond à la hauteur moyenne des pics et des creux existant superficiellement, elle est caractérisée par le nombre R_a qui correspond à la hauteur moyenne du relief de la surface. Expérimentalement, on considère qu'une surface est lisse par rapport à l'impact d'une goutte de métal pour $Ra < 0.05\mu m$. Lorsque la goutte atteint le substrat, la matière remplit en partie les creux du substrat, et sous

l'effet d'une vitesse d'impact importante, elle est éjectée dans d'autres directions liées au relief de la surface. En fonction de la position de l'impact et de l'état de surface local, la goutte est éjectée selon des directions différentes. Par conséquent, l'impact, bien que toujours gouverné par les mêmes phénomènes, ne reproduit pas exactement la même évolution en fonction de la zone d'impact [28].

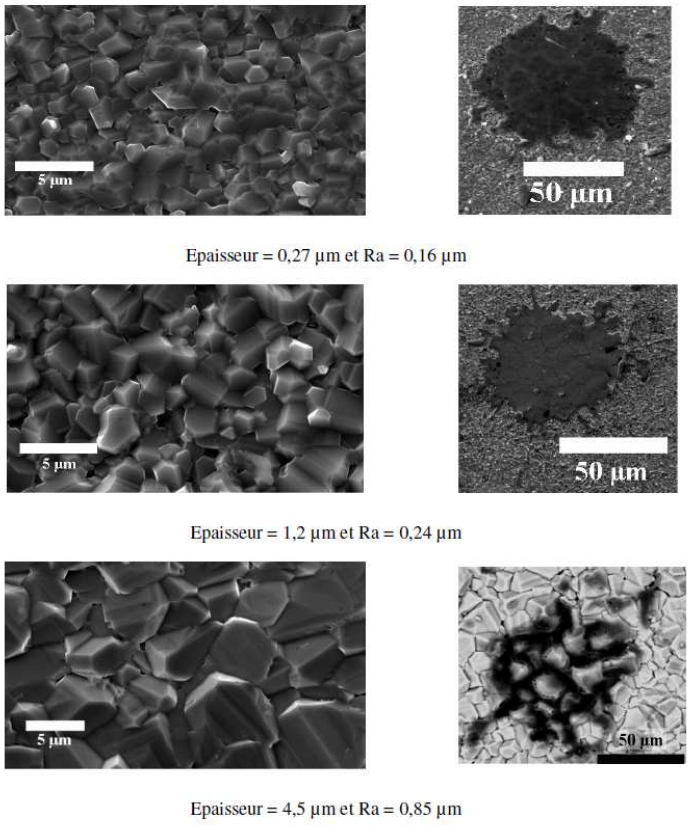


Figure 2.8 : **Influence de la rugosité sur l'étalement des lamelles [28]**

En se référant à une rugosité et donc à un état de surface moyen homogène, on définit une évolution moyenne de l'impact. Sur substrat lisse (substrat polymiroir Ra<0,05), les particules arrivent fondues au contact du substrat à des vitesses de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde [28] : ces vitesses élevées et la viscosité réduite des particules liquides favorisent leur étalement sur le substrat pour former un film liquide dont l'épaisseur est de

l'ordre de quelques micromètres. Sur un substrat rugueux (substrat sablé Ra>0,5), l'étalement est totalement différent et la morphologie des lamelles dépend essentiellement de la topologie du substrat, de ses aspérités figure (2.8).

2.2.5. Nombres adimensionnels

Lorsque la goutte s'écrase sur le substrat, de nombreux paramètres physiques jouent un rôle dans le comportement de la particule fluide. Afin de quantifier leur influence, des nombres adimensionnels sont introduits sous la forme d'un rapport qui permet de rendre compte de la compétition entre plusieurs phénomènes. Parmi ces nombres les plus couramment utilisés pour l'impact de gouttes sont :

Nombre de Reynolds *:* $$R_e = \frac{\rho L U_0}{\mu} \qquad (2.27)$$

Avec :

ρ *:* masse volumique, L : échelle de longueur caractéristique. u_0 : vitesse caractéristique, μ *:* viscosité dynamique.

R_e compare le flux de quantité de mouvement par convection avec le flux de diffusion visqueuse. Il permet de décrire le type de régime d'écoulement de la goutte, laminaire, inertiel voire turbulent.

Nombre de Weber: $$W_e = \frac{\rho L U_0^2}{\sigma} \qquad (2.28)$$

Avec :

σ *:* tension superficielle.

W_e : compare les forces d'inertie et les forces de tension superficielle. En fonction de sa valeur, la goutte aura plus ou moins tendance à se séparer en plusieurs gouttes secondaires.

Nombre de Péclet : $$P_e = \frac{V d}{\alpha} \qquad (2.30)$$

Qui représente le rapport de transfert de chaleur par convection au transfert de chaleur par conduction. Ce nombre intervient lorsque le transfert de chaleur est pris en compte.

Avec ρ : la masse volumique de la particule (kg/m3) ; d : le diamètre de la particule avant impact (m) ; v : sa vitesse (m/s) ; μ : sa viscosité dynamique (Pa.s) fonction de la température T (K) ; σ : la tension de surface (J/m²) ; D : le diamètre de la particule étalée (m) ; α : la diffusivité thermique (m²/s).

Nombre d'Ohnesorge :

$$O_h = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma L}} = \frac{W_e^{1/2}}{R_e} \qquad (2.31)$$

Oh rend compte de la dissipation visqueuse par rapport aux forces de tension superficielle. Sa valeur définit la morphologie de l'impact (éclaboussure, déposition ou rebond).

Nombre de Sommerfeld :

$$K = \sqrt{\frac{\rho L U_0^2}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho U_0 L}{\mu}}} = \sqrt{W_e \sqrt{R_e}} = O_h \cdot R_e^{1.25} \qquad (2.32)$$

De par son écriture, K permet de définir le type d'impact de la goutte. En effet, il possède les dimensions associées au nombre d'Ohnesorge et celles du nombre de Reynolds.

Nombre de Stéfan : $S_t = \frac{c_p (T_p - T_f)}{\Delta H_f}$ (2.33)

Par des combinaisons de ces nombres, on décrit la dynamique de l'impact en fonction des conditions initiales. La plupart du temps, afin de définir le comportement d'une goutte, les auteurs examinent le degré maximum d'étalement, c'est-à-dire le diamètre maximum du splat rapporté au diamètre initial de la goutte.

2.3. Echanges thermiques lors de l'impact

Lorsque la goutte et le substrat ont des températures initiales différentes, l'impact constitue un contact brusque qui s'accompagne d'échanges thermiques soudains.

Les particules cèdent leur énergie au substrat après l'impact. Cette énergie correspond à la chaleur qu'elles ont emmagasinée pendant leur traitement: chaleur spécifique et chaleur de fusion. Le chauffage du substrat par les particules dépend donc de l'état thermique des particules et du débit massique de poudre.

Plusieurs études ont porté sur l'analyse des champs thermiques dans le substrat et dans la goutte afin d'étudier comment la disposition initiale et le type d'écoulement pouvaient avoir un lien avec les échanges de chaleur. Il a ainsi été mis en évidence que le refroidissement et l'étalement de la goutte se produisent simultanément, plus ou moins rapidement selon que la diffusivité du substrat est forte ou non [29,30].

2.4. Résistance thermique de contact

La solidification de la goutte est d'autant plus rapide que l'évacuation de la chaleur à travers le substrat est importante et rapide. Cependant, le contact entre les deux milieux n'est pas parfait. La rugosité du substrat génère des interstices, où la conduction se fait en général peu, du fait que le fluide interstitiel, l'air, est peu conducteur. C'est pourquoi, La notion de résistance thermique de contact est introduite (RTC).

Lorsque la goutte s'étale, la surface de contact évolue, en particulier sous l'effet de la tension de surface (en phase liquide) et de la contraction du métal à la solidification, et les échanges thermiques sont transitoires.

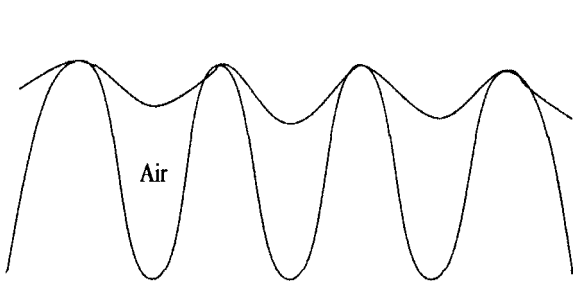
Ce contact imparfait est une zone où les propriétés physiques varient très rapidement. Le flux de chaleur est donc très perturbé dans cette " couche de transition ". La conduction par contact réel s'effectue au niveau des pics du substrat. La résistance thermique de contact dépend de nombreux paramètres : géométrie de la surface, rugosité, nature du fluide interstitiel, températures initiales du substrat et de la goutte (influence sur la mouillabilité, la

pression de contact et la tension superficielle), et propriétés physiques du substrat. La RTC permanente dépend du type de rugosité, de la répartition et du nombre des points de contact. Il n'existe pas de relation générale. Sa détermination repose le plus souvent sur une étude expérimentale.

2.4.1. La résistance thermique de contact lors de l'impact d'une goutte

Lors de l'impact d'une goutte sur un substrat, la résistance thermique de contact peut provenir de plusieurs phénomènes : A l'instant de l'impact, la goutte produit sur le substrat une pression qui permet un contact plus ou moins important entre les deux milieux. En effet, la rugosité du substrat définit le nombre de contacts réels entre les deux matériaux et donc la facilité de passage de la chaleur. La pression de la goutte va modifier cette surface de contact réel et donc la résistance thermique associée. Cependant, comme il s'agit d'un milieu fluide, l'écoulement peut être à l'origine de pièges d'air entre les pics de rugosité plus gros ou à l'inverse le remplissage de ces creux. Ensuite, cette pression diminue et joue un rôle de moindre importance dans les instants suivants. Cette pression est directement liée à la vitesse d'impact et à la dimension de la goutte [31].

Les études concernant l'impact de gouttes avec prise en compte d'une résistance thermique de contact sont variées : expérimentalement, il a été montré que lorsqu'une goutte s'étale, la "rugosité" de la goutte, qui doit correspondre à l'inverse de la rugosité du substrat, était légèrement inférieure à cette dernière comme illustré en figure 2.9. De plus, il apparaît que cette résistance thermique de contact évolue dans le temps. D'une valeur importante, elle diminue rapidement pour atteindre une valeur constante [32]. Sur ce principe, certains auteurs simplifient le modèle en ne prenant en compte que la valeur constante de la RTC pendant toute la durée de l'étalement [33].



Substrat

Figure 2.8 : Illustration du contact d'une goutte et d'un substrat rugueux

Ainsi lorsqu'une goutte liquide impacte sur un substrat solide présentant une rugosité de surface non nulle, celle-ci s'étale sur le substrat et se refroidit par conduction de la chaleur vers le substrat à travers l'interface lamelle- substrat. Lorsque la goutte vient s'étaler, différents phénomènes peuvent favoriser ou non le contact liquide- solide à l'interface et jouer ainsi sur une plus ou moins bonne évacuation de la chaleur. Ce contact va agir directement sur la valeur de la résistance thermique de contact RTC à l'interface définie à l'instant t comme la différence de température entre le bas de la goutte (Tg) et le haut du substrat (Ts) divisé par le flux de chaleur Ø :

$$R_{th} = \frac{T_g - T_s}{\emptyset} \qquad (2.34)$$

Durant de l'étalement, l'échange thermique entre la goutte et la surface du substrat par le flux de chaleur traversant cette dernière crée une résistance thermique de contact entre la goutte liquide et le substrat.

Le contact entre un solide et un liquide en cours de solidification fait l'objet de très peu d'études et reste mal maîtrisé de par la nature du contact. Les variations des propriétés physiques et mécaniques ainsi que de la géométrie du contact changent le comportement de la résistance thermique de contact.

2.5. La solidification

Dans beaucoup de recherches industrielles concernant la pulvérisation de gouttes, la matière subit un changement d'état au contact avec le substrat. Ce phénomène permet d'obtenir à partir de particules liquides un revêtement solide. La solidification est un phénomène qui fait intervenir des propriétés thermiques autant que mécaniques.

La solidification débute par la nucléation. Il s'agit de l'apparition de germes solides autour desquels commence le changement d'état. La solidification se produit lorsque la goutte atteint

une température inférieure à la température de solidification qui correspond à la formation d'un nucleus stable. Celui-ci est issu de la diffusion d'atomes ou molécules qui constituent la phase liquide, et qui s'agrègent les uns aux autres. La germination est le principe de ce phénomène : la transition liquide -solide est contrôlée par une barrière d'activation d'énergie. La rugosité de la surface aide la formation des germes dans le liquide. La solidification débute naturellement plus facilement au niveau du contact avec un corps extérieur que spontanément dans le milieu lui-même [34].

Les études expérimentales ont montré que lorsque la température de substrat (substrats lisses ou rugueux) est très faible, la solidification rapide entraîne sur la goutte (métallique ou céramique) la formation de digitations et une morphologie en étoile ; car la solidification génère un gradient de contraintes important provenant de la forte différence de température entre les deux milieux, alors qu'avec un substrat à haute température (tout en restant en-dessous du point de fusion de la goutte) la goutte génère un disque régulier [35].

Ils ont montré expérimentalement aussi qu'un substrat relativement chaud retarde le début de la solidification et laisse donc l'étalement s'achever avant le début de la solidification. A l'inverse, lorsque la particule s'écrase sur un substrat très froid, la température de goutte diminue au-dessous de la température de sous –refroidissement [36]. La solidification débute et l'énergie mécanique contenue dans le liquide provoque la projection de la matière, ce qui résulte en une morphologie du splat en étoile. De plus, il apparaît que chauffer le substrat avant l'impact des gouttes améliore l'adhérence [37].

Dans le procédé de projection thermique, la solidification débute à l’interface entre la lamelle et le substrat (ou les couches de dépôt précédentes). Le refroidissement de la lamelle s’effectue essentiellement par conduction thermique à l’interface, il est donc régi par la qualité du contact. Ce dernier est caractérisé par un coefficient global d’échange thermique h quantifiant les échanges thermiques avec la lamelle et influant directement sur la vitesse du refroidissement. Les facteurs les plus importants, régissant le refroidissement sont la qualité du contact thermique ainsi que l’épaisseur de la lamelle. Ces influences sont traduites par le nombre de Biot.

$$B_i = \frac{h \cdot e_p}{K_s} \qquad (2.35)$$

Avec *h*, coefficient d'échange thermique à l'interface, e_p l'épaisseur de la lamelle, K_s la conductivité thermique du substrat. Le nombre de Biot permet, selon sa valeur, de classer le refroidissement de la lamelle en trois catégories [35] :

• B_i >30 : le contact thermique est considéré parfait, la résistance thermique de contact est très faible (inférieure à 10-8m².K.W-1), le refroidissement est qualifié d'idéal.

• B_i <0,01, le transfert thermique à l'interface est limitant, la résistance thermique de contact est élevée (en général supérieure à 10-6m².K.W-1) et le refroidissement de la lamelle est isotherme.

• 0,01< B_i <30, le refroidissement est qualifié d'intermédiaire. L'efficacité du transfert thermique est fonction de la résistance thermique de contact R_{th} , définie comme l'inverse du coefficient d'échange interfacial h ; plus elle est faible, meilleur est le contact. Les grandeurs qui ont le plus d'influence sur la vitesse de refroidissement des lamelles, ainsi que sur leur solidification, sont leur épaisseur, le contact lamelle- substrat, ou couches déjà déposées, caractérisé par la résistance thermique de contact (R_{th}) et la température du splat.

2.6. Les modèles de la formation des lamelles

Différentes études analytiques, numériques et expérimentales ont été entreprises pour étudier l'influence des paramètres des particules à l'impact (vitesse d'impact, température des particules, viscosité) sur la taille des lamelles formées et sur leurs modes d'étalement et de solidification. Ces études conduisent généralement à la détermination de ξ = D/d qui représente le degré d'étalement de la goutte et qui est défini comme le rapport du diamètre de la lamelle étalée D, supposée cylindrique ou sphérique, au diamètre de la particule avant l'impact d.

2.6.1. Modèles Analytiques

Les premiers modèles développés étaient consacrés à l'étude de l'étalement des gouttes sur des substrats lisses. Le but était toujours de déterminer le degré d'étalement maximum ξ_m d'une particule fondue projetée sur un substrat solide [39,40, 41,42].

Ces modèles établissent des corrélations entre la forme finale des lamelles et les paramètres de l'impact, les propriétés des matériaux constituant la lamelle et le substrat ainsi que l'état de surface de ce dernier à travers des relations de type:

$$\xi_m = C \cdot R_e^{\alpha} \qquad (2.36)$$

Plus tard des modèles ont été établi où les auteurs font l'hypothèse que les phénomènes d'étalement et de solidification ne sont pas simultanés, et supposent que la vitesse du front de solidification à travers la lamelle est plus faible que la vitesse d'étalement de la goutte sur le substrat. Des expressions similaires ont été obtenues avec des valeurs de l'exposant α variant entre 0.2 et 0.125, et une valeur de la constante C variant entre 0.8 et 1.2941 [43, 44,45, 46]. D'autres études traitent de l'évolution de la morphologie des lamelles et des expressions plus complexes étaient proposes pour relier ξ_m aux paramètres d'impact [47, 48, 49, 50,51].

2.6.2. Modèles Numériques

Différents modèles ont été présentés pour étudier numériquement l'impact d'une goutte liquide projetée sur substrat lisse et plan [52,53]. Ils supposent une géométrie bidimensionnelle et une forme sphérique ou cylindrique des gouttes. L'approximation axisymétrique limite l'étude à une vitesse initiale des gouttes normale à la surface des substrats. Le contact entre la lamelle et le substrat est considéré comme parfait. Ils résolvent les équations de l'écoulement du fluide en tenant compte de la convection, de la viscosité et de la tension de surface. Leurs résultats, en général, s'accordent avec les prédictions des modèles analytiques.

Les paramètres d'entrée de ces modèles sont: le diamètre initial de la goutte d, la vitesse d'impact v_0, la densité massique ρ du liquide, sa viscosité μ, la tension de surface liquide-gaz σ et l'angle de contact liquide-substrat θ. La présentation adimensionnelle du problème réduit le nombre de variables à trois : l'angle de contact, le nombre de Reynolds R_e et le nombre de Weber W_e.

a)- Aspect dynamique

La principale difficulté de l'aspect dynamique de ces modèles réside dans le fait qu'une extrême déformation du fluide ait lieu à une échelle de temps très courte. Pour modéliser la dynamique de l'impact et de l'étalement des particules, les équations de ces modèles ont été résolues avec de nombreuses simplifications (Ils résolvent les équations de Navier Stokes en coordonnées cylindriques avec une méthode de différence finies, en négligeant la tension de surface et la viscosité.).

Ainsi, ces premiers modèles ont aboutit soit à des résultats numériques de l'étalement qui ne donnent pas le diamètre final de la lamelle ou à des expressions du degré d'étalement maximum de forme similaire à celle prédite par le modèle de Madjeski [40], mais avec un des

coefficients légèrement inférieur (ex : $\xi_m = R_e^{0.2}$) . La vitesse radiale du liquide déduite est plusieurs fois plus importante que la vitesse initiale d'impact de la goutte.

Bertagnolli et al [54] ont adopté la méthode des éléments finis avec une approche Lagrangienne pour simuler le processus d'étalement d'une goutte liquide céramique (Zircone) impactant sur un substrat plan et solide sous les conditions de projection plasma. Ils prédisent la géométrie finale de la goutte en fonction des paramètres du processus de projection plasma, et suivent l'évolution thermique de la lamelle jusqu'à la solidification. Le mouvement du liquide est gouverné par l'équation de conservation de la quantité de mouvement dans un volume V couplée à l'équation de l'énergie. Ils tiennent compte, de la viscosité du liquide, de la tension de surface et de la convection. Leurs résultats montrent que l'effet de la température initiale de la goutte et du substrat ainsi que la résistance thermique de contact sur le processus d'étalement n'est pas significatif alors que ces paramètres sont importants pour les processus de refroidissement et de solidification.

Dans leur approche numérique, Mostaghimi et Chandra [55,56] ont tenu compte de l'écoulement du fluide de la particule et du transfert thermique liquide-substrat. La dynamique du fluide est gouvernée par les équations de Navier Stokes et est obtenue en multipliant les composantes de vitesse par des facteurs correctifs (variant de 0 à 1) correspondants aux fractions de volume, évaluées par une équation de conservation additionnelle. Ils complètent ensuite ce travail par le transfert thermique de la goutte liquide au substrat. Les équations de la mécanique des fluides et de transfert thermique sont ensuite résolues par une méthode de différences finies en adoptant une approche Eulérienne pour décrire le mouvement du liquide. Pour des gouttes d'eau, les simulations montrent un phénomène de recul de la goutte à l'impact et une accumulation de matière autour de la périphérie de la lamelle.

S.Sampath et ses coauteurs [57] ont proposé aussi un modèle axisymétrique de la déformation d'une goutte liquide sphérique projetée sur un substrat plan et solide. Ils résolvent les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement en tenant compte de la tension de surface durant tout le processus d'étalement. Les auteurs utilisent la méthode de l'enthalpie dans leur approche numérique pour l'équilibre thermique lors de la solidification. Les simulations de l'impact des gouttes de métal (Mo) montrent l'effet de quelques paramètres sur l'étalement comme : la vitesse et la température des particules, la vitesse d'impact, la température du substrat

Ces modèles axisymétriques à deux dimensions permettent de mieux comprendre la dynamique de l'impact, de l'étalement et de solidification, mais ils ne permettent pas d'examiner l'aspect asymétrique des éclaboussures des lamelles étalées en détails. Pasandideh-Fard et ses coauteurs [58], ont développé un modèle numérique fondé sur la résolution des équations de Navier-Stokes et de l'équation de conservation de l'énergie, Ils ont donc développé un modèle tridimensionnel de flux de surface libre avec le transfert de chaleur et la solidification pour représenter la formation des lamelles. Ce modèle semble le plus adapté du point de vue théorique et donne la meilleure comparaison avec les données expérimentales.

Des modèles plus sophistiqués ont été développés par la suite, impliquent une géométrie tridimensionnelle de l'écoulement du fluide. Ils traitent le refroidissement des particules pendant la phase d'étalement en tenant compte de la résistance thermique de contact à l'interface lamelle-substrat, ainsi que le phénomène d'éclaboussure à [59, 60, 61, 62,63]. Ces calculs montrent une influence importante de la solidification du liquide au cours de son étalement sur la morphologie des lamelles étalées ainsi que de la rugosité de la surface sur laquelle s'étale la particule (cette rugosité est représentée par la surface d'une lamelle précédemment déposées et solidifiée).

Ces travaux de simulation ont proposé des modèles tridimensionnels de l'écoulement d'un fluide à surface libre permettant de modéliser le phénomène de déposition et d'éclaboussures induit lors de l'étalement des lamelles en utilisant parfois différents code commerciaux bidimensionnel ou leur extension comme : le code RIPPLE, le code FLOW-3D, SOLA-VOF, Simulent DROP,…. Ils tiennent compte du transfert thermique et de la solidification des lamelles au cours de l'étalement et reposent sur les simplifications suivantes:

- l'impact d'une particule liquide sur un solide se fait dans une atmosphère inerte ;
- la forme de la goutte est sphérique à l'impact ;
- l'écoulement du fluide est considéré comme Newtonien et laminaire ;
- seule la composante de la pression normale à la surface du liquide est prise en compte, les autres composantes étant supposées négligeables. La dynamique du fluide est gouvernée par les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \qquad (2.37)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t^*} + \vec{V} \cdot \left(\vec{V} \cdot \vec{V}\right) = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla} P + \nu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{\rho} F_b \qquad (2.38)$$

Où V représente la vitesse, P la pression, ρ la densité massique, υ la viscosité cinématique et Fb des forces de volume agissant sur le fluide.

Le profil de la surface de la goutte déformée est défini selon le schéma du volume de fluide fractionnel. Dans cette méthode, on définit une fonction scalaire f qui représente une fraction du volume d'une cellule contenant le fluide: f=1 lorsque la cellule est pleine de liquide ; f=0 pour une cellule vide ; et elle est comprise entre 1 et 0 lorsqu'elle contient une surface libre. Cette fonction satisfait à l'équation d'advection suivante :

$$\frac{\partial f}{\partial t^*} + \left(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}\right) f = 0 \qquad (2.39)$$

La tension de surface est modélisée par une force de volume agissant sur le liquide à sa surface libre F_b. Le contact à l'interface lamelle substrat est caractérisé par une résistance thermique de contact:

D'autres [64,65,66] reprennent la même procédure et tiennent compte dans leur code de la solidification de la particule lors de son étalement .Ils traitent la partie solide à l'aide d'une approche qui consiste à introduire une fraction de volume θ définie par:

θ = 1 la maille contient uniquement un liquide

θ = 0 la maille ne contient que du solide

0 < θ < 1 la maille contient du liquide et du solide.

Les vitesses normales et tangentielles des faces des mailles contenant uniquement le matériau solide sont considérées comme nulles. Les équations modifiées de continuité et de quantité de mouvement s'écrivent alors comme suit:

$$\vec{\nabla} \cdot (\theta \vec{V}) = 0 \qquad (2.40)$$

$$\frac{\partial (\theta \vec{V})}{\partial t^*} + (\theta \vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{\theta}{\rho}\vec{\nabla} P + \theta \nu \nabla^2 \theta \vec{V} + \frac{\theta}{\rho}\vec{F}_b \qquad (2.41)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t^*} + \left(\theta \vec{V} \cdot \vec{\nabla}\right) f = 0 \qquad (2.42)$$

Où P est la pression, ν est la viscosité cinématique et F_b représente les forces de volume agissant sur le fluide. Les auteurs ont proposé que le processus de solidification soit la cause principale du phénomène d'éclaboussure de la lamelle lors de son étalement.

Récemment le groupe Chandra [67] a étudié l'étalement et la solidification d'une particule individuelle de la Zircone projetée dans les conditions de projection plasma sur un substrat rugueux. Cette étude porte sur des simulations numériques et des observations expérimentales pour prédire la forme finale d'une lamelle, la vitesse de trempe du liquide et son comportement lors de la solidification. Il consiste aussi à résoudre les équations de Navier-Stokes et un algorithme de volume de fluide (VOF) est utilisé pour suivre la surface libre du fluide. Le calcul montre que la solidification commence pendant la phase de l'étalement et que la couche solide déstabilise le liquide résiduel qui s'écoule dans la direction radiale et peut être éventuellement à l'origine du phénomène d'éclaboussure.

On considérant des plans inclinés, d'autres auteurs [68] ont étudié l'impact de gouttes d'eau. Ils ont étudié l'influence de la mouillabilité en considérant l'angle de contact statique et dynamique pour aboutir aux différents régimes d'impact et le processus d'étalement. Ces simulations montrent l'effet de l'inclinaison et de ce fait la vitesse d'impact et de solidification.

b)- Aspect thermique

Les modèles de transfert thermique unidimensionnel couplés aux modèles qui décrivent l'étalement de la matière sur le substrat traitent le refroidissement et la solidification des lamelles comme un problème uniquement thermique. Ce sont des modèles simples comparés aux modèles de l'écoulement de la phase fluide comme ceux développés par Mostaghimi qui traitent la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leurs morphologies, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière. Ce type de modèle global n'offre pas l'accès à une information détaillée comparée à celle recueilli à partir d'un modèle simple de transfert thermique. En effet, ce dernier peut permettre de décrire la transformation de phase liquide-solide en tenant compte des cinétiques de nucléation et de la croissance cristalline et de déterminer la phase sélectionnée. Il donne ainsi accès à la température et au taux de

nucléation, à la densité des germes et à la taille et distribution des grains. De plus, ces modèles prédisent les effets de l'angle de contact que forme le germe avec le substrat en présence du liquide, de la qualité du contact thermique entre la lamelle et le substrat (exprimée par une résistance thermique de contact) de la taille des lamelles, des propriétés physiques du couple de matériaux lamelle-substrat, des températures initiales du liquide et du substrat, sur les processus de nucléation et de solidification et sur la microstructure de la lamelle et par conséquent celle du dépôt. Ces modèles thermiques sont basés sur la résolution des équations de conduction de la chaleur de la lamelle en cours de solidification couplée à l'équation de la chaleur dans le substrat [34].

2.7. Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux phénomènes liés et à l'écoulement de la goutte (à la formation de la lamelle). On a examiné à l'échelle des particules fondues les phénomènes dynamiques et thermiques qui vont permettre la compréhension des conditions d'impact qui influencent l'écoulement et la géométrie finale d'une goutte.

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.

Les modèles de l'impact d'une goutte permettent de déterminer les temps caractéristiques des différents phénomènes : impact, étalement, solidification ; ils permettent également de mieux appréhender l'influence de la solidification sur la phase d'étalement et enfin ils donnent la géométrie finale de la lamelle.

Cependant, ces modèles restent difficiles à intégrer dans des outils de simulation numérique du procédé complet, en grande partie à cause du temps de calcul qu'ils nécessitent.

Pour ce faire, les modèles actuellement proposés dans la littérature utilisent des lois analytiques ou dérivées de simulation numériques qui permettent de prédire le diamètre de la lamelle et son épaisseur en fonction des paramètres d'impact de la particule (température, vitesse et taille) ou sa morphologie soit en 2-D ou 3-D, utilisant toujours les équations de Navier-Stokes.

Chapitre 3

Résolution numérique de l’impact de gouttes sur un substrat solide

Introduction

La physique qui s'articule autour du comportement d'écrasement d'une goutte sur un substrat liquide ou solide reste encore de nos jours mal maîtrisée, même si beaucoup d'études, expérimentales et numériques, ont permis d'améliorer la compréhension de l'écoulement de la particule liquide. La reproductibilité expérimentale des phénomènes est difficile à mettre en œuvre, la prédiction de la structure du revêtement et de sa durée de vie est donc difficile à déduire de considérations expérimentales. C'est pourquoi l'outil numérique devient rapidement indispensable pour élargir l'horizon d'études sur ce domaine. La simulation numérique se doit alors de respecter les phénomènes entrant en jeu lors de l'impact d'une ou plusieurs gouttes, en s'assurant que les hypothèses de configuration initiale (taille, géométrie des gouttes par exemple) restent valides et soient comparables à des techniques expérimentales. Dans ce chapitre nous présentons successivement les équations de base du problème numérique puis les principales méthodes de résolution numériques utilisées pour résoudre ce type d'équation présentées dans la littérature.

3.1. Les équations du problème :

3.1.1. Méthodes numériques

De nombreuses études ont été réalisées, en adoptant des techniques diverses, pour comprendre les phénomènes qui gouvernent l'impact de gouttes... Par application du principe fondamental de la dynamique, le bilan des forces au sein de chaque fluide newtonien exprime la vitesse en fonction des paramètres du système :

$$\nabla \cdot u = 0 \qquad (3.1\text{-a})$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu)\right) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot (\mu[\nabla u + \nabla^{\mathrm{T}}\mathrm{u}]) + F_{TS} + B_r \qquad (3.1\text{-b})$$

Où ρ et μ, sont respectivement la masse volumique et la viscosité de la phase concernée. A cette équation " de base " sont ajoutés différents termes pour prendre en compte les divers aspects de ce genre de problème. Le terme B_r sera explicité ultérieurement. Le terme F_{TS}

quant à lui est lié à la notion d'interface de deux fluides non miscibles. Afin de prendre en compte le caractère diphasique fluide- air de l'impact de goutte, l'interface des phases immiscibles est modélisée par une équation définie grâce à la conservation des flux de matière, donc de la masse. Soit V la vitesse locale de l'interface de normale ni et $\rho_1 u_1$ et $\rho_2 u_2$ les quantités de mouvement associées aux fluides 1 et 2. Par conservation de la masse [69] :

$$\rho_1(u_1 \cdot n_i - V) = \rho_2(u_2 \cdot n_i - V) \quad (3.2)$$

Cette équation permet de traduire la continuité du champ de vitesse normal à l'interface mais ne prend pas en compte la présence de la tension superficielle dans cette zone. A l'équation 2.2 est donc ajouté un terme qui correspond à la force issue de la tension superficielle, soit :

$$F_{TS} = \sigma k \delta n_i \quad (3.3)$$

Où σ, κ et δ sont respectivement le coefficient de tension superficielle, la courbure moyenne locale de l'interface et la fonction Dirac puisque l'interface est considérée comme un saut de propriétés physiques. Ces équations sont valables dans chaque phase fluide prise séparément. Afin de déterminer le champ de vitesse dans tout le domaine, il est nécessaire de résoudre une équation supplémentaire qui prend en compte la présence de l'un ou l'autre des fluides en chaque zone du domaine.

3.1.2. Modèle à un fluide

Ce type de modèle a été utilisé par plusieurs auteurs pour simuler la déposition sur substrat sec ou l'impact sur film liquide [69]. Il convient donc de définir une fonction qui détermine géométriquement la position des phases dans le domaine. Soient φ1 et φ2 les fonctions phase définies par :

φ1(x, y, z, t) = 1 dans les zones contenant le fluide 1

φ1(x, y, z, t) = 0 dans les zones ne contenant pas de fluide 1

φ2(x, y, z, t) = 1 dans les zones contenant le fluide 2

φ2(x, y, z, t) = 0 dans les zones ne contenant pas de fluide 2

Les fluides étant immiscibles, il vient tout naturellement que :

φ2(x, y, z, t) = 1- φ1(x, y, z, t).

Par continuité des vitesses à l'interface, la vitesse locale de l'interface V vérifie :

$$V = u_1 \cdot n_i = u_2 \cdot n_i \qquad (3.4)$$

Les fonctions phase φ1 et φ2 se déplacent en fonction de la vitesse de l'interface V. Cette évolution peut être décrite par une équation cinématique qui relie les fonctions à V :

Cette équation d'advection définit le transport de chaque phase dans le domaine, en particulier à l'interface où intervient le saut de phase de 1 à 0. Au lieu d'utiliser deux fonctions de phase φ1 et φ2, il est plus intéressant d'introduire une fraction volumique qui répond aux mêmes lois et définie sur tout le domaine.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = 0 \qquad (3.5)$$

Cette fraction volumique appelée fonction couleur et notée C prend pour valeur 1 dans le fluide qui compose la goutte et 0 dans l'air. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide a une valeur de un et une maille vide zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide.

Les caractéristiques physiques des milieux s'expriment en fonction de la présence de chaque fluide :

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)C \qquad (3.6\text{-a})$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)C \qquad (3.6\text{-b})$$

A l'aide de ce modèle et de la définition de la fonction couleur, la tension superficielle peut être exprimée seulement en fonction de C.

3.1.3. Modélisation de la tension de surface

La tension superficielle est une force qui agit sous la déformation de l'interface. Elle est

donc proportionnelle à la courbure de l'interface :

$$F_{TS}(M) = \sigma k(M) n_i(M) \tag{3.7}$$

La géométrie de l'interface n'est pas une donnée du problème. Le fait d'exprimer le problème par un modèle à un fluide permet de s'affranchir de cette donnée. Il est donc nécessaire de pouvoir exprimer la courbure κ grâce aux autres variables afin de déterminer la tension superficielle.

Une méthode consiste à sommer les forces de tension tangentielles à l'interface sur le contour ds d'un volume élémentaire, puis à exprimer la tension superficielle comme intégrale curviligne sur ds des termes σ (M) où t est une force de surface tangentielle à l'interface et

M Є ds. A l'aide de cette définition, la courbure moyenne k est égale à l'opposé de la divergence de la normale à l'interface. On obtient donc :

$$F_{TS}(M) = -\sigma(\nabla \cdot n_i)(M) n_i \tag{3.8}$$

De plus, la normale à l'interface est également fonction de la fonction couleur C :

$$n_i = \frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \tag{3.9}$$

Finalement, le terme de tension superficielle s'exprime seulement en fonction du coefficient de tension et de la fonction couleur C :

$$F_{TS} = \sigma \nabla \left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right) \cdot \frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \tag{3.10}$$

Au final, le système d'équations à résoudre est le suivant :

$$\nabla u = 0 \tag{3.11-a}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \nabla C = 0 \tag{3.11-b}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla(\mu[\nabla u + \nabla^T u]) - \sigma \nabla \left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right) \cdot \frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \tag{3.11-c}$$

Ce système permet de résoudre les inconnues (u, ρ, C) par une expression volumique des équations de mouvement en incompressible avec prise en compte des forces interfaciales sans la détermination explicite de la géométrie de la courbure de l'interface.

A la notion de la tension superficielle s'ajoute celle de l'angle de contact. Cet aspect est difficile à analyser, tant d'un point de vue expérimental que numérique. La prise en compte de l'angle de contact reste encore très peu utilisée car difficile à mettre en œuvre numériquement, mais des considérations théoriques montrent que sous certaines gammes de nombres de Reynolds et de Weber, l'angle de contact a peu d'influence [40].

3.1.4. Modélisation du substrat

Dans les paragraphes précédents, les équations de Navier-Stokes et d'advection permettent de résoudre l'écoulement de chacune des phases fluides du domaine. Mais le substrat quant à lui, bien que solide et sans vitesse, ne doit pas être traité différemment. C'est pourquoi un terme supplémentaire est ajouté à l'équation de mouvement pour prendre en compte le caractère fixe du substrat, tout en considérant cet élément comme un fluide :

$$Br = -\frac{\mu}{k}(u - u_0)$$

Ou : μ est la viscosité, k st la perméabilité milieu, u_0 est une vitesse de référence.

L'équation de mouvement s'écrit dans tout le domaine d'étude :

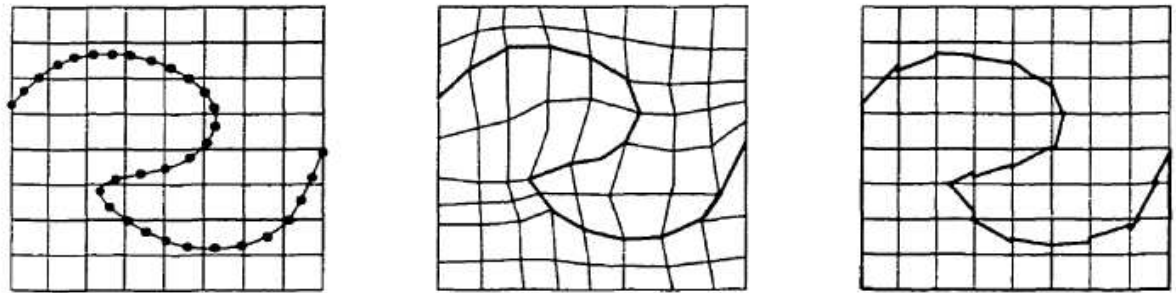
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla(\mu[\nabla u + \nabla^{T} u]) - \sigma\nabla\left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right)\cdot\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} - \frac{\mu}{k}(u - u_0) \qquad (3.12)$$

Dans le cas le plus général, ce système d'équation ne fait intervenir de solution analytique. L'outil numérique devient alors indispensable pour fournir des résultats approchés mais précis sur un domaine discrétisé à la fois en temps et en espace.

Ce type d'étude sur ces modèles numériques conduit généralement à la détermination du ξ = D/d qui représente le degré d'étalement de la goutte et qui est défini comme le rapport du diamètre de la lamelle étalée D, supposée cylindrique ou sphérique, au diamètre de la

particule avant l'impact d, et aussi à l’évolution de la morphologie des lamelles lors de l’impact et l’influence des paramètres des particules à l’impact (vitesse d’impact, température des particules, viscosité) sur la taille des lamelles formées et sur leurs modes d’étalement et de solidification.

3.2. Méthodes numérique de l’équation d’advection



a b c

Figure 3.2: Les méthodes de représentation des interfaces [75].
(a) la méthode des marqueurs, (b) la méthode du maillage adaptatif, (c) la méthode VOF.

II existe différentes approches pour résoudre les écoulements à interface sur maillage fixe. La première est appelée la méthode des marqueurs (MAC ou Marker and Cell). Elle consiste à " semer " des marqueurs sur l'interface à l'instant initial. La résolution des équations de Navier-Stokes et le mouvement des marqueurs permet de déterminer l'évolution de l'interface. Une interpolation entre les marqueurs permet de reconstruire l'interface [76].

Un autre schéma de résolution de l'équation d'advection est nommé VOF (Volume Of Fluid) et s'effectue en trois étapes. En utilisant cette méthode VOF, en fonction de la distribution de la fonction couleur C, l'interface est reconstruite comme discontinuité de cette fonction. Ensuite, les équations de Navier- Stokes fournissent le champ de vitesse, puis grâce au champ de vitesse, la nouvelle distribution de la fonction couleur C est calculée par

l'équation d'advection. Cette méthode offre de meilleures possibilités en vue d'ajouter au système les équations de la thermique qui vont se baser sur la description de l'interface. Un autre avantage de cette méthode est qu'elles est plus économique que la méthode utilisant les marqueurs car une seule valeur (la fraction volumique) doit être associée à une maille de calcul et que le champ de fraction volumique permet, par une étape de reconstruction géométrique de l'interface, de déterminer la position exacte de la surface libre. C'est cette étape de reconstruction qui fait la spécificité de la méthode VOF. Lors de l'étape d'advection, l'interface reconstruite est transportée en utilisant la vitesse du fluide et on évalue alors les flux volumiques qui passent entre les différentes cellules du domaine de calcul, ce qui permet de construire le nouveau champ de fraction volumique.

3.3 L'équation de l'énergie

II existe diverses méthodes pour déterminer le champ thermique d'un milieu avec prise en compte de la solidification. Certains auteurs définissent le milieu qui change de phase comme deux domaines séparés par une interface qui correspond au front de solidification. Le champ thermique de chacun des milieux est résolu séparément et de manière explicite, et l'interface correspond à une condition limite interne au système [72]. La difficulté de cette méthodologie repose sur la nécessité de déterminer la position du front de solidification, ce qui s'effectue souvent par la méthode de Landau sur un maillage évolutif, de plus, elle s'adapte mal aux cas 2D et 3D.

Une deuxième méthode, implicite en temps, est appelée méthode du *Cp* apparent. Dans l'équation de l'énergie, le terme source *Se* correspond au changement de phase liquide / solide. Il s'exprime usuellement comme fonction de la fraction solide f, et du temps :

$$Sc = \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \qquad (3.34)$$

où L_f est la chaleur latente de fusion

Cette méthode est efficace dans les cas où la solidification s'effectue à vitesse modérée, mais elle devient inefficace lorsque la solidification est trop rapide.

Un autre type de méthode est celui à terme source, à l'équation de l'énergie, on ajoute un

terme qui prend en compte l'absorption ou le dégagement de chaleur par changement de phase. Cette technique s'adapte bien aux maillages fixes et fournit une bonne précision. La résolution, basée sur la méthode " New Source " repose sur un algorithme itératif de type point fixe sur la température où le nœud qui change de phase est ramené et maintenu à la température de changement de phase grâce au terme source. Ce calcul est réitéré jusqu'à la convergence de la température avec un terme source égal à la chaleur latente. Cette procédure permet de découpler les champs de température et de fraction solide calculés au même instant.

2.4. Solidification

La résolution des équations de conservation de l'énergie à l'intérieur du domaine de calcul permet de déterminer la proportion de phase solide dans chaque maille. Pour déterminer le front de solidification, a chaque pas de temps, on définit un nouveau paramétré, la fraction de volume fluide, telle que $\Theta = 1$ pour une maille remplie de liquide et $\Theta = 0$ si la cellule contient seulement du solide, et $0 < \Theta < 1$ si les mailles se trouvent sur le front de solidification A partir des valeurs de Θ, la surface de la phase solide est déterminée de la même manière que la surface libre de la goutte (à partir de C)

3.5. Méthodes numériques de résolution

La résolution des problèmes diphasiques avec des fluides non miscibles pose le problème de la présence d'une interface séparant les fluides. Pour déterminer entièrement l'écoulement, il est nécessaire :

• de résoudre les équations du mouvement dans les deux phases,

• de représenter l'interface dans l'espace,

• de caractériser le mouvement de l'interface, sachant que sa dynamique est étroitement liée à celle des fluides environnants.

Le choix d'une méthode numérique dépend étroitement du type de problème considéré. Les méthodes les plus employées pour simuler les écoulements diphasiques en présence d'interfaces recourent à une discrétisation des équations du mouvement sur un maillage [70].

Il existe deux types de méthodologies différentes pour résoudre les problèmes diphasiques. La première, dite approche lagrangienne, consiste à discrétiser un seul des deux fluides en présence, et considérer l'interface des deux fluides comme condition limite du problème. Les équations de Navier-Stokes dans ce domaine permettent de déterminer le mouvement de ce milieu sans prendre en compte l'autre fluide. Cela nécessite un maillage adaptatif qui suit les déformations de l'interface. L'intérêt de ce type de méthode est de fournir avec précision l'évolution de la surface libre en fonction du temps et grâce à un maillage évolutif, de raffiner localement pour améliorer la précision des phénomènes liés à l'interface. Les inconvénients de cette méthodologie résident dans le coût et le temps de calcul nécessaires à la reconstruction de l'interface et des conditions limites du système à chaque pas de temps. Le coût est d'autant plus fort que les déformations sont intenses [71]. De plus, cette méthodologie n'est pas bien adaptée aux problèmes de rupture de fluide que l'on rencontre par exemple lors du splash qui génère des gouttes secondaires. Cette méthode est intéressante lors de la déposition de gouttes sur le substrat [72] puisqu'elle autorise la prise en compte de l'angle de contact comme condition limite. En se basant sur des angles déterminés par voie expérimentale, les auteurs ont pu retrouver un comportement proche des phénomènes physiques. En appliquant cette technique sur un maillage non structuré, ils ont pu simuler la dynamique et la thermique de l'impact d'une goutte sur le substrat en tenant compte d'une résistance thermique de contact sur une épaisseur finie entre les deux matériaux. Cette technique suppose de plus connue la condition limite de la surface libre de la goutte souvent prise comme adiabatique [73].

L'autre méthodologie est dite eulérienne. Elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides. L'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins coûteuse que la précédente [74]. De plus, les phénomènes de rupture d'interface ne posent pas de problèmes de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, la seconde s'écrasant sur le splat stabilisé formé par la première. Cependant, de par sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation d'advection au travers de une variable *C*. Comme toute équation, celle-ci ne peut donc qu'approcher la position de l'interface.

Le code de calcul ANSYS permet de résoudre les équations précédentes avec un modèle à un fluide où les équations de Navier-Stokes et de l'énergie sont découplées. L'originalité repose sur la discrétisation, de type éléments finis, qui se distingue par la généralité de sa formulation, permettant la représentation des géométries les plus complexes, ainsi que l'imposition la plus naturelle des conditions aux limites. Par défaut, le code possède des conditions limites de type Neumann généralement utilisés dans les simulations de l'impact de gouttes.

Présentation du code de calcul ANSYS

ANSYS est un ensemble de programmes puissants, basé sur la méthode des éléments finis, pour la simulation des divers problèmes rencontrés en engineering, capable de résoudre un large éventail de problèmes allant des analyses linéaires les plus simples aux problèmes non linéaires les plus complexes. ANSYS contient une très riche bibliothèque d'éléments qui peut virtuellement modéliser n'importe quelle géométrie. Il a aussi une large bibliothèque de lois de comportement allant des plus simples aux plus sophistiquées et qui peut simuler le comportement de pratiquement tous les matériaux typiques en engineering tels que le béton, l'acier, le caoutchouc, les polymères, les composites, et les céramiques. Conçu comme un programme général de simulation, ANSYS peut être utilisé non seulement pour l'étude des problèmes de structures mais aussi pour la simulation d'autres problèmes tels que le transfert de chaleur, la diffusion de la masse, l'analyse thermale électrique couplée…. Parce qu'il comprend plusieurs composantes telles que : ANSYS/professionnel, ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Structural, ANSYS/LS-DYNA, ANSYS/Flotran,…etc .Chaque composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (types d'éléments, conditions aux limites, tracés,…etc). Dans notre étude, on a utilisé le module ANSYS/Multiphysics dans Flotran, qui permet de traiter la majorité des problèmes de dynamique des fluides et de transferts de chaleur. Il offre des outils très puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions, en utilisant un des éléments thermo-fluides : l'élément FLUID141, pour la simulation 2D, et l'élément FLUID142, pour la simulation 3D.

3.6. Procédure numérique

Pour simuler la dynamique de l'impact et de l'étalement des particules par ce code de calcul, les équations de Navier Stokes ont été utilisées en adoptant la méthode des éléments finis avec une approche Lagrangienne. Avec cette méthode, on peut suivre la géométrie finale de la goutte et l'évolution thermique de la lamelle jusqu'à la solidification. Le mouvement du liquide est gouverné par l'équation de conservation de la quantité de mouvement couplée à l'équation de l'énergie. Ces lois sont souvent des équations différentielles qui font intervenir des composantes de la vitesse (u,v), des champs de température (T) et de pression (P).Un algorithme de volume de fluide (VOF), intégré dans le code de calcul ANSYS, est utilisé pour suivre la surface libre du fluide (la goutte durant son étalement).

Il est évident que ces équations sont non-stationnaires et non-linéaires. Il faut donc choisir une stratégie optimale de couplage des techniques itératives de résolution des systèmes non linéaires avec des techniques d'intégration dans le temps. Ce choix est crucial pour la bonne convergence et l'efficacité de l'algorithme numérique de résolution des problèmes d'impact en dynamique rapide.

Pour les calculs, la simulation repose sur les simplifications suivantes :
- l'impact d'une particule liquide sur un solide se fait dans une atmosphère inerte ;
- la forme de la goutte est sphérique à l'impact ;
- l'écoulement du fluide est considéré comme Newtonien et laminaire ;
- seule la composante de la pression normale à la surface du liquide est prise en compte, les autres composantes étant supposées négligeables ;
- Le contact entre la lamelle et le substrat est considéré comme parfait.

Les paramètres d'entrée de cet modèle sont : le diamètre initial de la goutte d, la vitesse d'impact v_0, la densité massique ρ du liquide, sa viscosité μ, la température initiale de la goutte et du substrat.

Conditions aux limites

Conditions aux limites de l'écoulement

La surface libre de la goutte et l'interface entre la goutte et le substrat sont affectes d'une condition de "non-glissement" qui permet de modéliser une surface qui interagit normalement avec le fluide en opposant une surface a l'écoulement.

Conditions aux limites thermiques

Elles sont de trois types :

1. Condition adiabatique : elle concerne la surface libre de la Lamelle (l'interface liquide - gaz).
2. Température constante : elle concerne les frontières extérieures du domaine. Dans le substrat, les frontières extérieures du domaine sont suffisamment éloignées de la zone d'impact pour ne pas être thermiquement affectées.
3. Température initiale : cette condition est appliquée seulement a la surfa ce du substrat (surface d'impact). Ensuite, cette température évolue, au cours du temps au contact de la goutte en fusion.

Découplage pression /vitesse

Dans les problèmes diphasiques, une des techniques fréquemment utilisée pour résoudre le couplage vitesse-pression est la méthode de projection. Dans cette méthode, on résout les équations de Navier-Stokes en prenant la pression au temps précédent comme référence, et en ajoutant la contrainte à divergence nulle du champ de vitesse. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée à l'impact de gouttes [74].

Une méthode mieux adaptée est celle du Lagrangien augmenté qui permet de découpler les champs de pression et de vitesse. Dans cette méthode itérative de type prédiction correction, on résout les équations de Navier-Stokes en ajoutant la contrainte d'incompressibilité (divergence nulle). Entre deux itérations temporelles, on résout L itérations de Lagrangien augmenté.

3.7. Stratégie de calcul

La stratégie de calcul peut être résumée comme suit :

- Création automatique du maillage (des nœuds et des connectivités des éléments),
- Lecture des paramètres physiques (viscosité, densité, conductivité, etc.), des sollicitations et des conditions aux limites,
- Construction des matrices et vecteurs élémentaires, puis assemblage de ceux-ci pour former le système global,

- Résolution du système des équations non linéaires, après prise en compte des conditions aux limites,
- Effectuer une étape Lagrangienne
- Solution

Enfin, Les simulations seront réalisés dans un domaine 2D cartésien pour mettre en place correctement les paramètres numériques de la simulation, pour localiser et analyser les zones singulière de l'écoulement des gouttes après leur écrasement sur le substrat solide et de s'assurer que l'impact est qualitativement bien restitué.

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le modèle physique utilisé le plus souvent pour simuler l'impact d'une ou de plusieurs gouttes sur un substrat solide, puis la résolution numérique du système d'équations. L'étape suivante consiste à réaliser la simulation de l'impact d'une goutte puis de plusieurs gouttes, soit les unes à coté des autres, soit les unes au-dessus des autres pour aboutir à la compréhension des phénomènes intervenant lors de la déposition de gouttes dans le but de réaliser la simulation d'un revêtement céramique.

Chapitre 4

Résultats numériques de l’impact de gouttes sur un substrat solide

Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des simulations numériques d'impact de gouttes sont présentés pour différentes configurations. Tout d'abord, on considère l'impact d'une goutte sur un substrat solide puis l'impact simultané de gouttes identiques afin d'observer les phénomènes de recouvrement du substrat et de rencontre des gouttes voisines en fonction de quelques conditions d'impact (distance entre deux gouttes, vitesse d'impact...). Enfin à cette configuration, on ajoute la présence de trains de gouttes dans le but de voir l'origine de la formation de la porosité dans les dépôts céramiques.

4.1. Résultats de simulations numériques

L'impact de goutte est influencé par plusieurs paramètres, tel que la vitesse d'impact, la taille de la goutte, la nature du liquide et en particulier sa tension de surface et sa viscosité, la rugosité qui joue un rôle primordiale pour le phénomène d'éclatement (éclaboussure), et la résistance thermique de contact. Il offre une grande richesse de comportements, suivant que la surface est sèche ou humide, suivant que l'inertie est importante ou non comparée aux termes de tension de surface, suivant que le fluide est plus ou moins visqueux, etc... On peut observer alors : une simple déposition, l'éclatement (splashing), la formation d'une corolle se cassant en gouttes secondaires (corona splash) ou le rebond total ou partiel de la goutte.

4.2Validation de l'impact de gouttes

Avant de commencer les simulations, nous avons procédé à une estimation initiale de la solution, le choix adéquat des conditions initiales permet d'atteindre une solution stable et une convergence accélérée des résultats. Comme premier résultat la figure 4.1 représente le domaine de calcul et les régions goutte-interface-substrat correspondantes qui est la base des configurations ultérieures de l'évolution de la morphologie des lamelles formée lors du processus d'écrasement.

Maillage et pas de temps

Deux types de maillage sont utilisés, un maillage constitué de quadrilatères réguliers à Interpolation linéaire, est progressivement densifié dans l'ensemble (goutte - substrat), et un maillage triangulaire dans le reste du substrat. Il est nécessaire pour les calculs de densifier le maillage dans les endroits suivants : la goutte et la zone de contact entre cette dernière et le

substrat où de fort gradient inter faciaux peuvent apparaître. Les éléments de ce maillage sont triangulaires à interpolation linéaires (figure 4.1). Le p as de temps est constant dans toutes les simulations et on résout les équations de Navier-Stokes en incompressible.

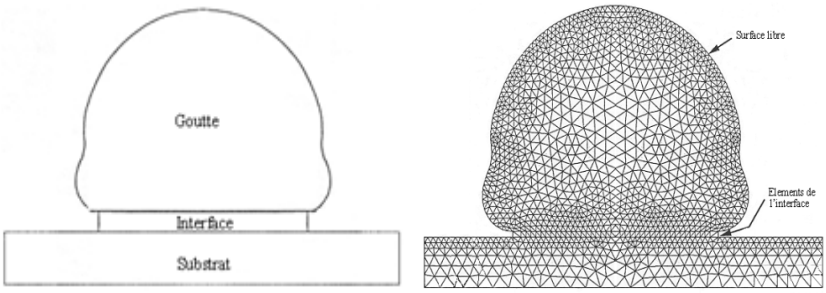


Figure 4.1 : domaine de calcul et les régions goutte-interface-substrat

Les résultats de simulation numérique sont présentés pour différentes configurations d'impact. On considère d'abord l'impact d'une seule goutte sur un substrat solide en fonction de la vitesse d'impact, de la température du substrat et aussi l'angle de contact, puis l'impact simultané, marginal et consécutif de plusieurs gouttes identiques pour pouvoir quantifier les phénomènes intervenants à l'échelle des particules. La simulation de l'impact d'un train de gouttes fera l'objet de la dernière étape de simulation dans le but de faire le point sur l'une des origines de formation des défauts dans les revêtements céramiques.

4.3. La morphologie d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat

Dans cette première étude, on s'intéresse à la simulation de l'écrasement d'une particule d'Alumine fondue sur un substrat d'acier inoxydable. Les caractéristiques du problème sont données au tableau 4.1.

Matériel	Particule : Alumine	Substrat: Acier	Unité
Densité	3x103	$7.832x10^3$	Kg/m^3
Viscosité	2.9x10-3	-	Pa.s
Conductivité thermique à20°c/500°c	26-35/10-15	64	W/m.K
Chaleur spécifique	900	434	J/kg.K
Température initiale	2400	300	K
Dimension Ø	50	Epaisseur : 25	µm
Vitesse initiale	150-200-250	0	m/s

Tableau 4.1. Paramètres physiques de l'Alumine.

4.3.1. L'écrasement de la particule d'Alumine sur un plan horizontal

Les résultats de simulation sont donnés en termes de champs de températures de part et d'autre des interfaces entre le substrat et la particule écrasée : la figure 4.1 montre les déformations successives et la morphologie d'une particule d'Alumine de 50µm de diamètre s'écrasant avec une vitesse de100m/s sur un substrat d'acier initialement à 300°k. La température initiale de la particule en fusion est supposée être le point de fusion du matériau.

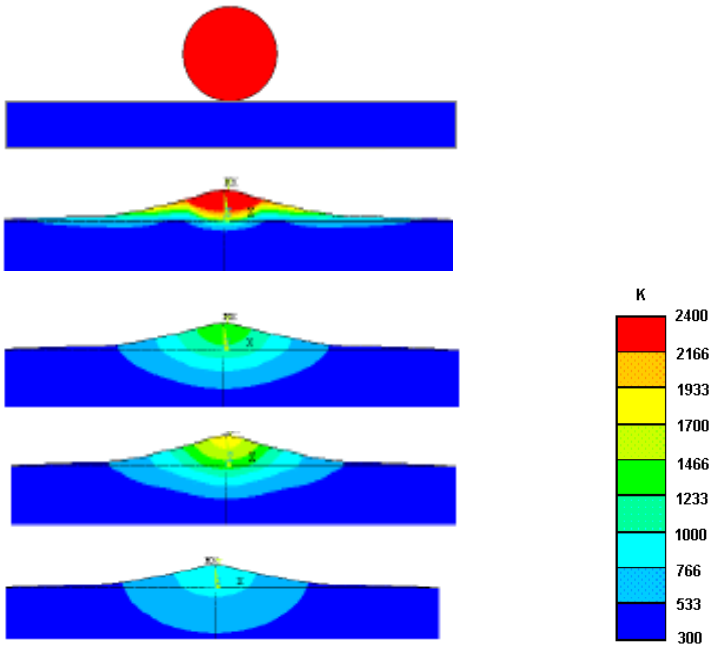


Figure 4.2. : L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k (150m/s).

Une fois que la particule a percuté le substrat, elle continue à se déformer et à s'étaler vers le bas grâce à sa pression interne pour former la lamelle. L'énergie cinétique de la particule est transformée en travail de déformation visqueuse puis en énergie de surface. L'étalement est alors contrôlé par des phénomènes mécaniques et thermiques. Juste après le contact, le refroidissement est modéré car l'évacuation de la chaleur s'oppose à la captation de chaleur due au changement de phase de la goutte sur le plan d'impact. Lorsque cette zone est solidifiée, le substrat ne capte plus localement cette chaleur latente et se refroidit rapidement. Cependant la totalité de la goutte n'est pas solide et le dégagement de chaleur latente se poursuit. Localement à la surface du substrat au point d'impact, le refroidissement ralentit jusqu'à la solidification totale de la goutte. Par convection, le champ de température à

l'intérieur de la goutte devient homogène et le front de solidification prend rapidement une forme plane. De plus, en figeant la particule d'Alumine, la solidification diminue l'énergie cinétique du système.

a)- Evolution des champs de pression d'une particule d'Alumine

La figure 4.3 montre les champs de pression développés lors de l'impact de la goutte d'alumine sur le substrat. On peut constater qu'au point d'impact, la haute vitesse d'impact génère une forte pression sous la goutte. Cette pression force le liquide à s'étaler radialement le long de la surface d'impact, son intensité agit donc directement sur la nature de l'écoulement de la goutte. Ainsi, la goutte s'étale grâce à sa pression interne pour former une lamelle. Tout au long de l'écoulement, jusqu'à stabilisation du système, l'énergie cinétique évolue par conversion en d'autres types d'énergies jusqu'à dissipation totale afin d'atteindre l'état stable. La solidification de la lamelle commence généralement avant que son étalement soit complètement terminé ce qui induit la rétraction du liquide.

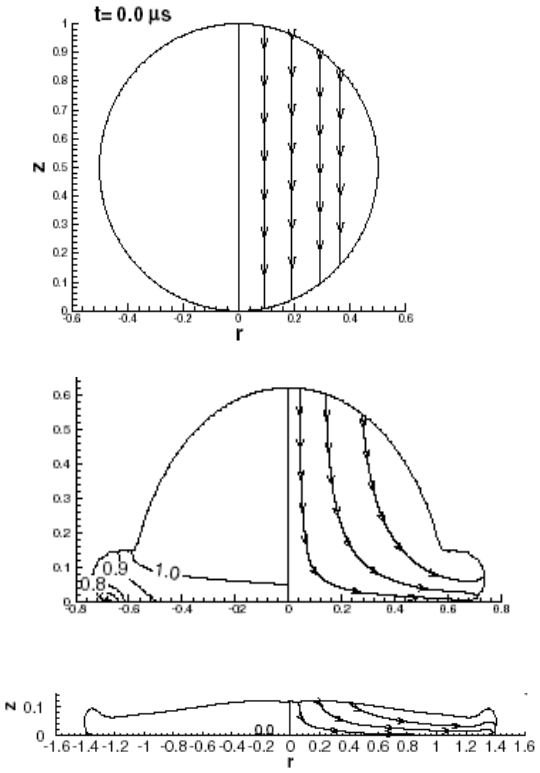


Figure 4.3 : Evolution des champs de pression d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k

b)- L'effet de la vitesse d'impact sur l'étalement de la particule d'Alumine :

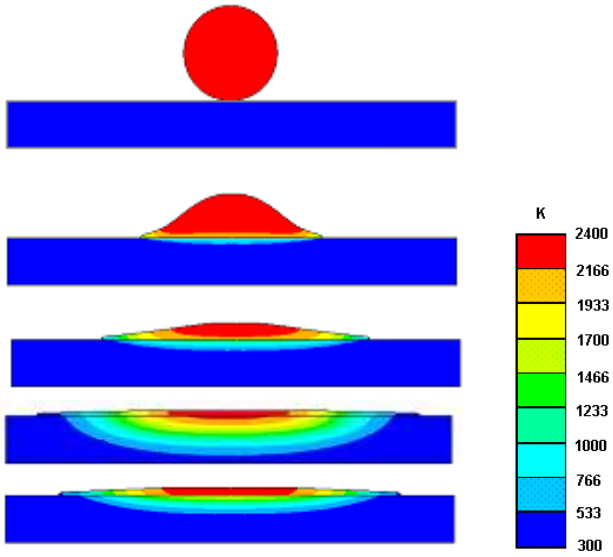


Figure 4.4 : L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k (200m/s).

La figure.4.4 illustre aussi l'évolution des champs de températures lors de l'impact de la même goutte d'Alumine sur le même substrat mais avec une vitesse de 200m/s. Lorsque la vitesse d'impact est plus élevée (l'inertie domine la dynamique), le substrat récupère rapidement de la chaleur ce qui maintient le système (substrat– goutte) à une température élevée en surface et limite la progression de la solidification. Donc à plus haute vitesse, la lamelle se solidifie difficilement car la chaleur apportée est plus abondante et celle-ci n'a pas le temps de diffuser dans le substrat d'où un meilleur étalement de la goutte. Inversement, lorsque la vitesse d'impact est faible, l'apport d'énergie est plus espacé et le système a plus de temps pour diffuser la chaleur vers le substrat ce qui permet le refroidissement rapide et donc sa solidification. La solidification intervient lorsque la goutte atteint une température inférieure à la température de fusion et contribue à figer la matière.

Donc, l'augmentation de la vitesse d'impact influe directement sur le temps d'étalement de la goutte (diminution) et aussi sur le diamètre maximum atteint par la lamelle (augmentation). Pour des vitesses plus élevées la morphologie de la goutte d'Alumine change et on peut remarquer une forme déchiquetée de la lamelle. Ce phénomène d'éclatement (éclaboussure) peut être plus intense avec l'augmentation de la vitesse d'impact. La figure 4.5 montre les

déformations successives et la morphologie de la même particule d'Alumine (50 µm) s'écrasant avec une vitesse de 250m/s et illustre le début de ce phénomène. Lorsque la goutte de l'Alumine arrive avec une vitesse élevée sur le substrat solide, elle se déforme et perd son aspect sphérique ce qui conduit dans la plus part des cas à l'émission de gouttelettes très violemment de la base de l'impact.

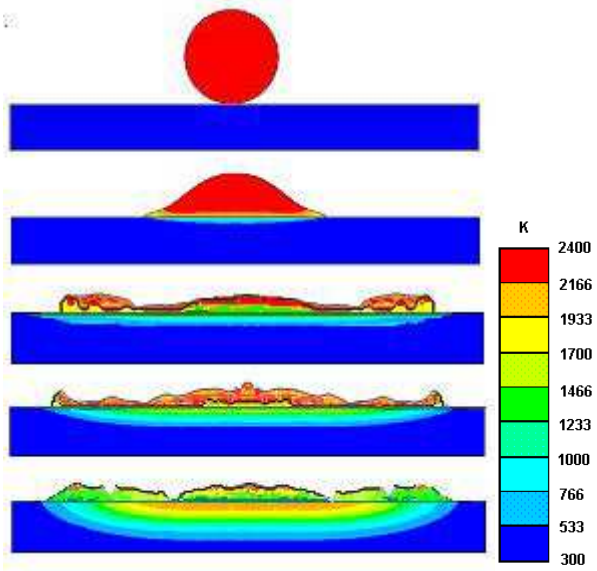


Figure 4.5 : L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 300°k (250m/s).

c)- L'effet de la température du substrat sur la morphologie de la goutte d'Alumine

La deuxième étude concerne la simulation de l'écrasement de la particule d'Alumine fondue sur le même substrat mais avec une température plus élevée (500°K). Les images générées de cette simulation montre une dynamique d'impact semblable à celle illustrée sur la figure 4.5 avec le phénomène d'éclatement avec une morphologie un peu différente. Lorsque la goutte de l'Alumine est en contact avec le substrat chaud, elle se déforme et perd aussi son aspect sphérique, en s'étalant plus ou moins largement sur le substrat (figure 4.6).

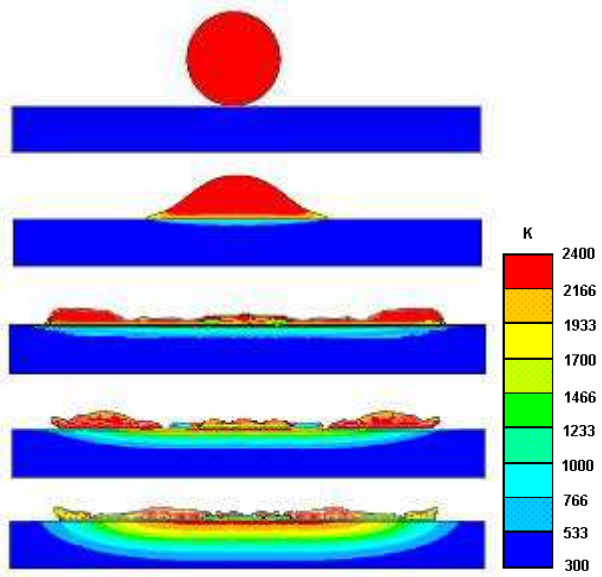


Figure 4.6 : L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat initialement à 500°k (200m/s).

Donc, dans le cas où la vitesse d'impact est plus élevée ou une température du substrat inférieure à la température de transition ou très élevée, l'impact favorise l'éclatement de la goutte fondue et donc l'éjection de la matière. En effet lorsque la vitesse d'impact augmente et que l'inertie devient suffisamment élevée, il devient plus facile au liquide de s'élever au dessus de la surface du substrat, ce qui conduit à la formation de gouttelettes. La partie centrale du splat formé se solidifie en premier et rapidement à cause de la grande différence de température entre le substrat et le splat. La partie entourant le centre ne se solidifie qu'après le phénomène de d'éclatement (splashing) d'où la forme déchiquetée des splats (figures 4.5, 4.6).

Ce phénomène réduit la surface de contact lamelle /substrat, ce qui induit une interface de mauvaise qualité. En fonction de la position de l'impact et de l'état de surface local, les gouttelettes sont éjectées selon des directions différentes. Ce processus de formation des splats détermine à la fois les caractéristiques microstructurales (phases cristallines, taille des cristallites) et macroscopiques (porosité et adhésion) du dépôt.

4.3.2. L’écrasement de la particule d’Alumine sur un plan incliné

L’étalement d’une particule d’Alumine de 50µm s’écrasant sur un plan incliné de 60°K et à une température initiale de 300°K est illustré sur la figure (4.7). A l’impact, la goutte s’étale de façon uniforme dans la direction radiale à partir du point d’impact. La valeur maximale de la densité de flux de chaleur est supérieure à ce point car c'est lors du contact de la goutte avec le substrat que la différence de température est la plus grande. La particule cède son énergie au substrat après l’impact. Cette énergie correspond à la chaleur qu'elle a emmagasinée pendant son traitement. La tension de surface entre en compétition avec la tension interfaciale entre le substrat et la goutte, et la tension interfaciale entre le substrat et l'air ambiant. La température de contact au niveau du plan d'impact augmente brusquement lors du contact puis décroît lentement, car non seulement la chaleur se diffuse dans le substrat mais sa base est maintenue à la température initiale, ce qui participe au refroidissement du substrat après l'impact de la goutte et donc à la solidification. La solidification se progresse jusqu'à ce que la totalité du splat soit solidifiée.

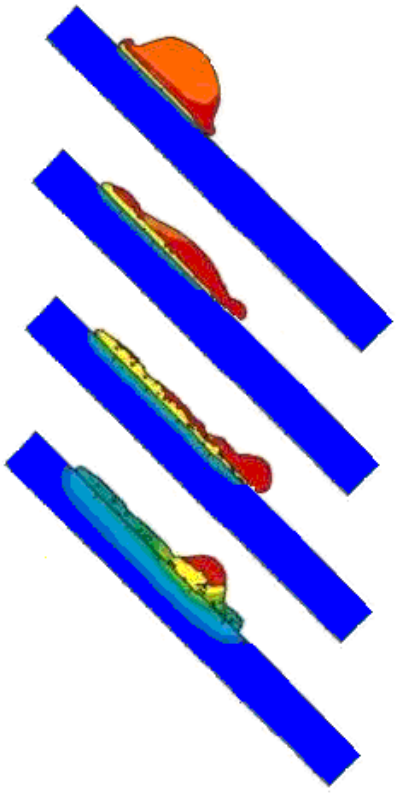


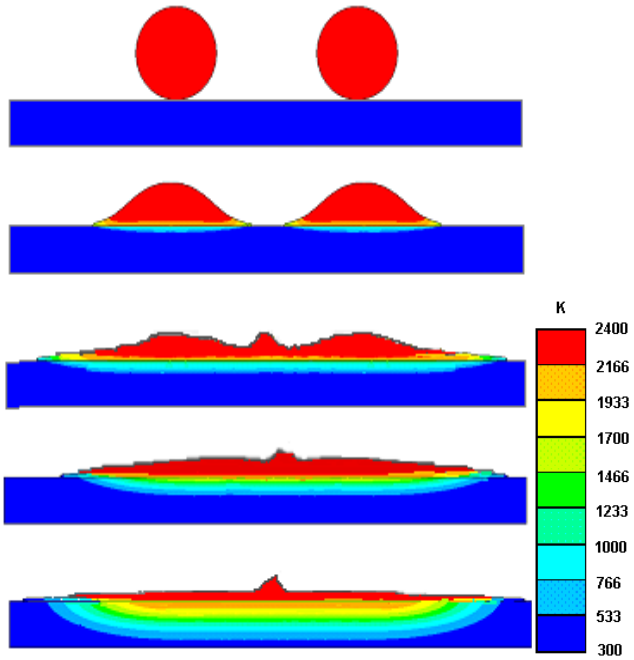
Figure 4.7: L’évolution du champ de température d’une particule d’Aluminium écrasée sur un substrat incliné de 60° initialement à 300°k

4.4. Impact simultané de gouttes identiques

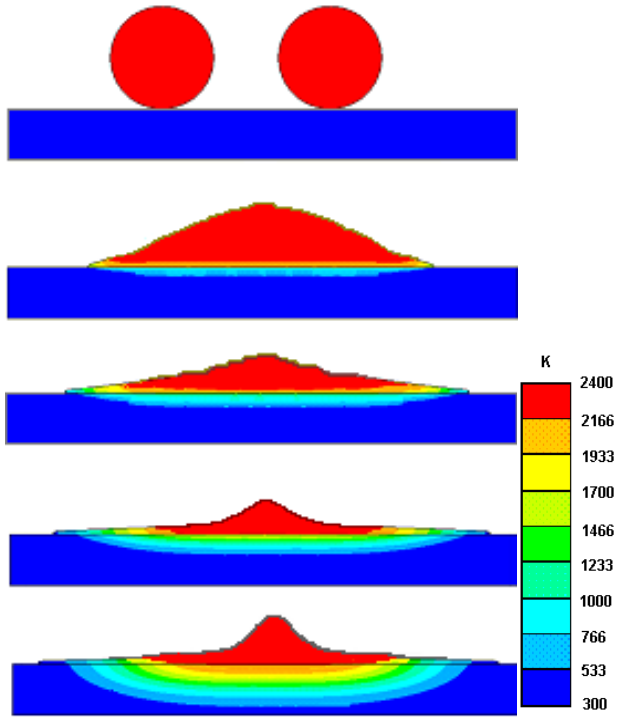
Lors de l'impact de gouttes simultanées, l'énergie cinétique de chaque goutte est convertie partiellement en énergies de forces visqueuses et de surface et énergie cinétique d'étalement. Cette dernière, au moment de la rencontre de deux gouttes voisines, produit un jet de matière puis un retour du fluide vers le point d'impact initial sous forme d'une onde de retour. Ce mouvement se reproduit jusqu'à stabilisation de la matière, soit par solidification totale du matériau (métal ou céramique), soit par conversion de l'énergie cinétique du fluide. Ce phénomène, bien sûr, ne se produit pas lors de l'étalement d'une goutte isolée. Cette différence de phénomènes entre l'étalement d'une goutte isolée et l'élévation du jet de rencontre de deux gouttes fait intervenir aussi une dynamique complexe.

4.4.1. L’Influence de la distance entre deux gouttes

Lorsque la distance entre deux gouttes est grande, l'apport d'énergie est plus lent et le système à plus de temps pour diffuser la chaleur vers le substrat. Par contre lorsque la distance entre les deux gouttes est petite, l'apport de chaleur limite le refroidissement et donc la progression de la solidification. Ainsi, lors de l'impact de la première goutte, la solidification est initiée très rapidement, mais le système accumule de l'énergie ce qui interdit la progression de la solidification et finit par refondre la zone solidifiée.



a)- la distance est grande



b)- la distance est petite

Figure 4.8 : Influence de la distance entre deux gouttes d'alumine écrasée sur un substrat solide de 300°K avec une vitesse de 200m/s.

La figure 4.8 illustre la morphologie de deux gouttes identiques d'Alumine de 50µm de diamètre s'écrasant simultanément sur un substrat lisse de 300°k avec une vitesse d'impact de 200m/s. Lorsque la distance entre les deux gouttes est accrue, l'énergie cinétique initiale est davantage convertie dans les autres formes d'énergies. La hauteur du jet est donc moins importante, puisque la matière fournit moins d'énergie cinétique. Lors de la création de l'onde de retour, celle-ci est moins grande et dissipe l'énergie plus rapidement. Il apparaît tout naturellement que lorsque la distance, entre les deux gouttes, augmente, la hauteur maximale du jet de rencontre diminue car une partie de l'énergie cinétique est convertie en travail de forces visqueuses et en énergie de surface durant l'étalement. Dans ce cas critique, il n'y a pas d'interaction entre les particules fluides, ce qui interdit le recouvrement total de la surface du substrat. Par contre, plus cette distance est faible et moins l'énergie se dissipe lors de l'étalement.

4.4.2. L'évolution du flux de chaleur à l'interface substrat-gouttes

En se basant sur la même simulation d'impact de gouttes, il est également intéressant d'observer l'évolution du flux à l'interface substrat-goutte au point d'impact et au point de rencontre (figure 4.9). Aux deux positions, la valeur maximale de la densité de flux est supérieure au point d'impact par rapport au point de rencontre car c'est lors du contact de la goutte que la différence de température est la plus grande. L'étalement permet non seulement de refroidir une partie de la goutte mais il a également comme rôle de mieux répartir la chaleur dans la goutte. Ainsi après rencontre de deux particules fluides, cette meilleure répartition permet de transmettre un flux de chaleur plus régulier le long du substrat. De même, la température atteint une valeur élevée au point d'impact alors qu'au point de rencontre, elle atteint un maximum pour une température bien plus inférieure. Puis après un certain temps, les températures diminuent et exhibent la même allure à des valeurs proches comme il est illustré sur la figure ci-dessous.

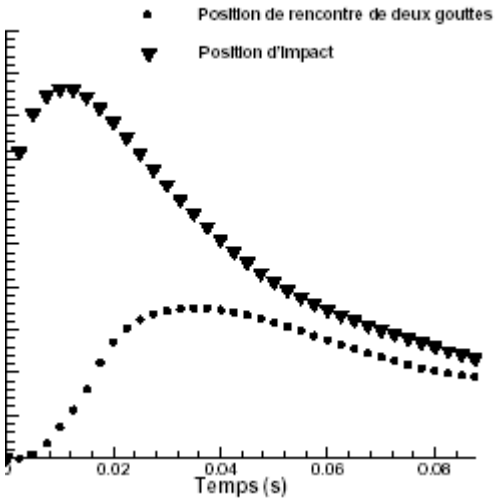


Figure 4.9 : Evolution des températures à l'interface et aux points de rencontre lors de l'impact de gouttes simultanées.

4.4.3. L'effet de la solidification

La prise en compte du changement de phase diminue la hauteur maximale du jet de rencontre, au même titre que cela diminue le degré d'étalement maximal d'une goutte isolée. En effet, une partie de l'énergie cinétique est convertie en travail nécessaire pour solidifier le matériau (métal ou céramique). Lors de la rencontre de gouttes, la quantité d'énergie cinétique disponible est plus faible par rapport au cas sans solidification, et le jet de rencontre est donc moins intense.

Juste après le contact, le refroidissement est modéré car l'évacuation de la chaleur s'oppose à la captation de chaleur due au changement de phase de la goutte sur le plan d'impact. Lorsque cette zone est solidifiée, le substrat ne capte plus localement cette chaleur latente et se refroidit rapidement. Cependant la totalité de la goutte n'est pas solide et le dégagement de chaleur latente se poursuit. Localement à la surface du substrat au point d'impact, le refroidissement ralentit jusqu'à la solidification totale de la goutte. Au niveau du point de rencontre des deux gouttes, on observe un seul ralentissement du refroidissement correspondant localement à la solidification de la goutte, mais aussi à la solidification totale du matériau.

4.5. Impact marginal de deux gouttes successives d'Alumine

L'impact consécutif de gouttes sur un substrat fait intervenir à la fois une dynamique complexe qui dépend de l'état du substrat et des échanges thermiques par apport successif d'énergie. Dans ce paragraphe on va étudier une configuration particulière de l'impact de deux gouttes sur un substrat, il s'agit d'une première goutte s'écrasant sur une surface. Une fois solidifiée et la température d'équilibre thermique établie, une deuxième goutte s'écrase sur la précédente le point d'impact de la deuxième goutte est situé sur le bord de la première goutte étalée (Figure 4.10). La température du substrat, évolue librement au cours du temps. L'impact de la première goutte représente le comportement de la lamelle, la forme finale solidifiée est donc un disque sur lequel vient s'écraser la seconde goutte. Le point d'impact de cette seconde particule n'est pas confondu avec le centre de la première goutte, le système n'est pas symétrique. L'analyse du champ de température montre que l'impact de la deuxième goutte transmet de la chaleur à la première lamelle.

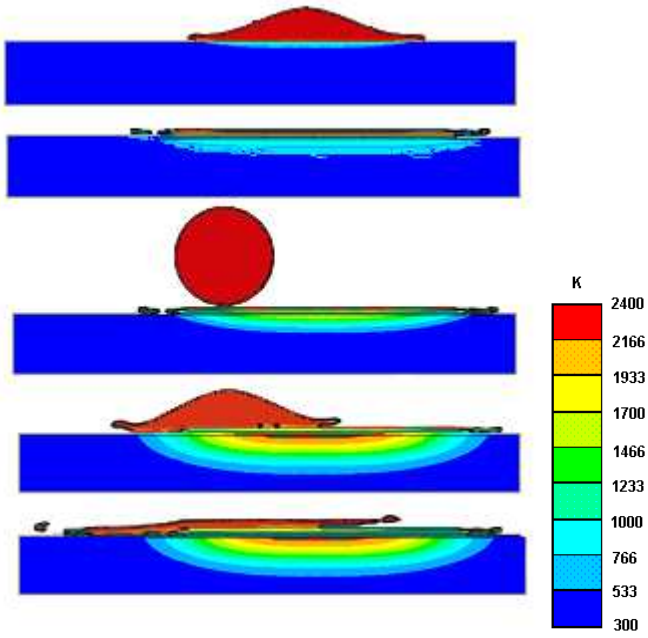


Figure 4.10 : L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine lors de l'Impact marginal de deux gouttes identiques sur un substrat initialement à 300°K avec une vitesse d'impact de 200m/s.

En effet, la première goutte est en contact avec le substrat ce qui implique que le refroidissement et la solidification sont rapides. Lorsque la deuxième goutte est déposée, elle entre en contact avec la première goutte d'Alumine qui n'est pas totalement solidifiée, et dont la température d'interface est supérieure à celle du substrat, ce qui induit une vitesse de refroidissement plus faible. Comme la température de contact est supérieure à la température de fusion, la deuxième goutte ne peut pas encore être solidifiée et réchauffe la goutte précédente qui refond. Lorsque le refroidissement se poursuit, l'écart de température à l'interface est faible, de telle sorte que la vitesse de refroidissement est plus lente qu'entre la première goutte et le substrat. Il en résulte que la solidification est plus lente, puisque les échanges thermiques nécessitent plus de temps pour solidifier le milieu.

La figure 4.11 montre l'évolution de la température de la 1ère lamelle formée sur le substrat d'acier. Le refroidissement de la première lamelle est très rapide et est achevé lorsque la seconde lamelle arrive, celle-ci réchauffe la surface de la première lamelle jusqu'à la température de fusion. Elle présente une large variation de température. Le pic de température de réchauffage de la première lamelle, qui résulte de la succession d'impact de lamelles, décroît progressivement en raison de l'isolement thermique de la première lamelle par celles déjà déposées.

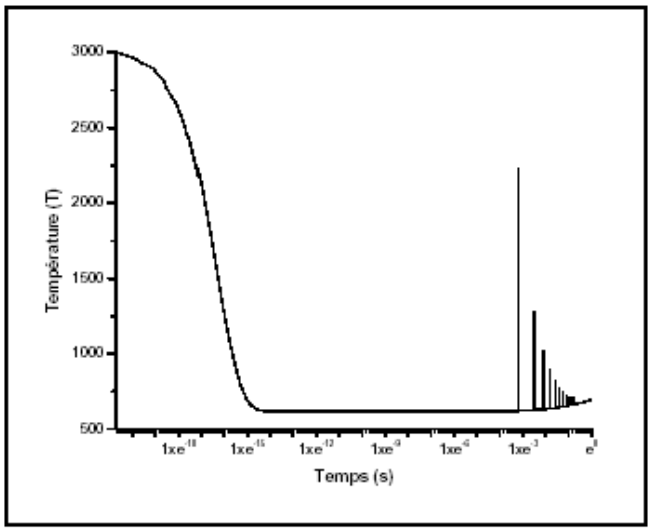
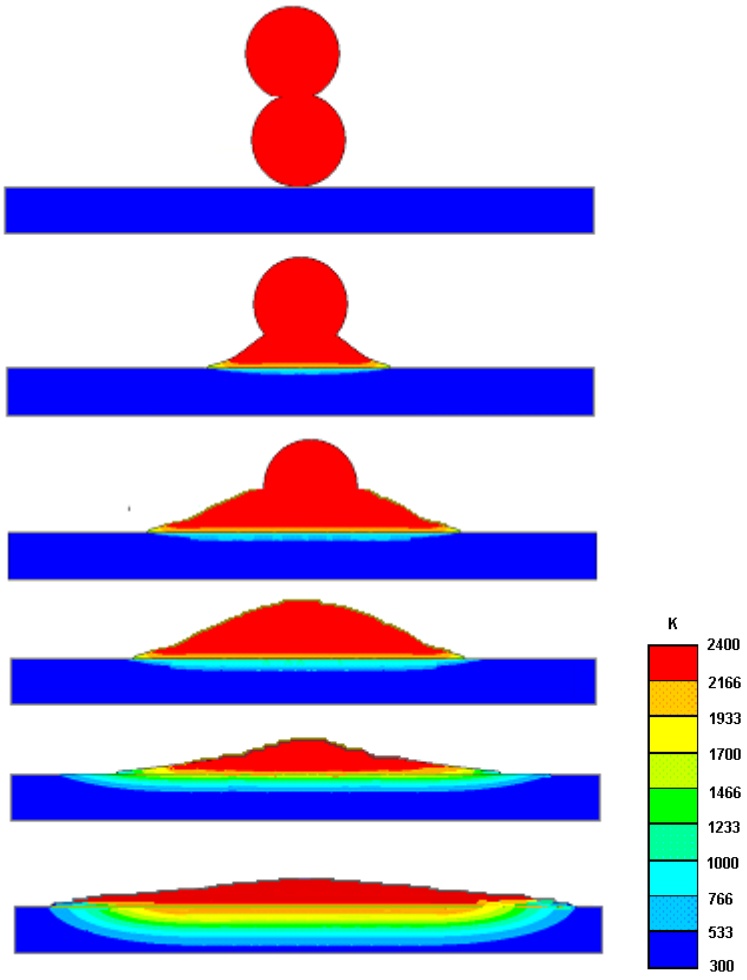


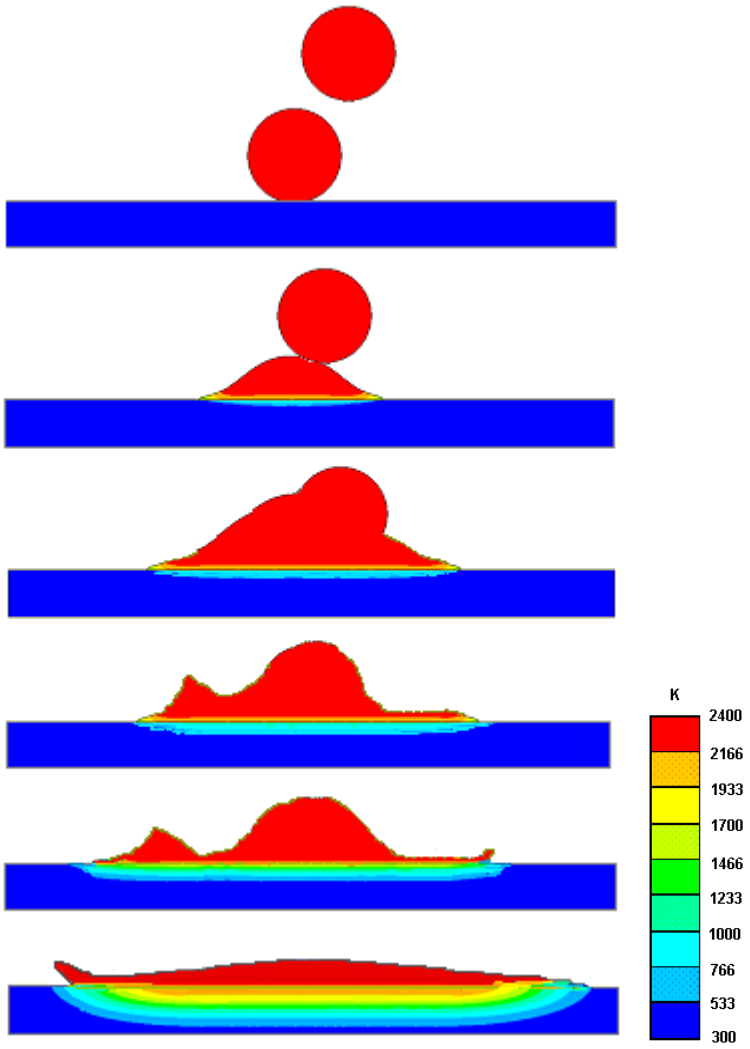
Figure 4.11 : Evolution de la température de la 1ère lamelle de l'Alumine

4.6. Impacts consécutifs de deux gouttes identiques

Pour ce type d'impact et d'écrasement, plusieurs configurations peuvent avoir lieu. La plus probable et celle illustrée par la figure 4.12 (a, b). Afin de mieux comprendre le phénomène d'impact de gouttes sur un substrat solide une autre étude numérique est schématisée de deux cas types. L'un est l'impact consécutif au même point de deux gouttes d'Alumine identiques de 50µm diamètre décalée de dt dans le temps verticalement. L'autre est l'impact consécutif au même point des deux gouttes décalée de dt dans le temps mais un peu inclinée. Dans les deux configurations le substrat est lisse de 300°k et la vitesse d'impact et de 200m/s.



a) Position verticale



b) Position inclinée

Figure 4.12 : L'évolution du champ de température d'une particule d'Alumine lors de l'Impact consécutif de deux gouttes identiques sur un substrat initialement à 300°K avec une vitesse d'impact de 200m/s avec un intervalle de temps dt.

La configuration de l'impact simultané de plusieurs gouttes est reprise, à laquelle on ajoute la présence de gouttes suivantes de même rayon, vitesse et température initiaux. Selon la fréquence d'impact, une goutte suivante peut s'écraser sur la précédente soit pendant la phase d'étalement de cette dernière, ce qui contribue à augmenter l'énergie cinétique de l'ensemble et ce qui va donc impliquer un jet de rencontre plus haut, soit pendant le retour de la matière après la rencontre de sa voisine, ce qui limite l'énergie cinétique contenue dans le fluide, mais ce cas est susceptible d'entraîner l'éjection de matière sous forme de gouttes secondaires.

La figure 4.12 illustre le comportement général de l'impact de gouttes successives. Les courbes correspondent aux hauteurs du matériau sur l'axe d'impact et l'axe de rencontre de deux gouttes. Dans les deux cas (a, b) de la figure ci-dessus, au niveau de l'axe d'impact, la hauteur du matériau diminue lors de l'étalement de la première goutte, puis augmente soudainement car elle correspond à l'arrivée de la seconde goutte. Puis la hauteur diminue et atteint une valeur supérieure à la hauteur minimale de la première goutte. La seconde goutte, qui apporte de l'énergie cinétique, limite le retour de la matière vers l'axe d'impact et contribue à une seconde montée du jet sur l'axe de rencontre, plus haute que lors de l'impact de la première goutte et aussi à un étalement plus marqué.

4.7. Simulation de l'impact d'un train de gouttes identiques

Afin de simuler l'impact 2D d'une infinité de gouttes sur le substrat tout en restreignant l'étude à un domaine fini. La configuration de l'impact simultané de plusieurs gouttes est reprise, à laquelle on ajoute la présence de gouttes suivantes de même rayon, vitesse et température initiaux. Les impacts sont définis par une fréquence. Cette configuration est illustrée en figure (4.13).Les résultats sont donnés en termes de températures de part et d'autre des interfaces entre le substrat et la première couche ou entre deux couches consécutives.

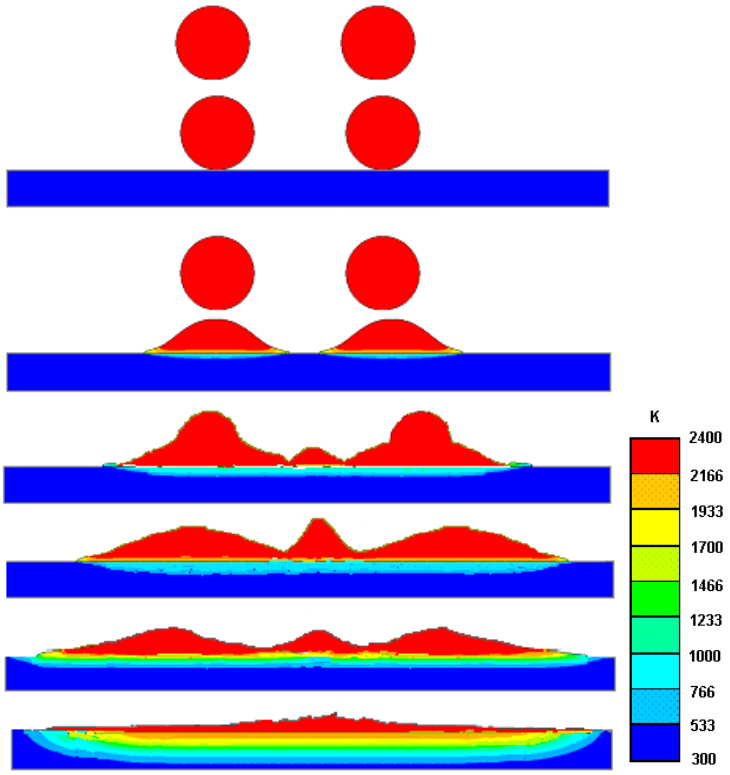


Figure 4.13: L'évolution du champ de température de l'impact d'un train de gouttes identiques d'Alumine lors de l'impact consécutif sur un substrat initialement à 300°K avec une vitesse D'impact de 200m/s avec un intervalle de temps dt.

Selon la fréquence d'impact, une goutte suivante peut s'écraser sur la précédente soit pendant la phase d'étalement de cette dernière, ce qui contribue à augmenter l'énergie cinétique de l'ensemble et ce qui va donc impliquer un jet de rencontre plus haut, soit pendant le retour de la matière après la rencontre de sa voisine, ce qui limite l'énergie cinétique contenue dans le fluide, mais ce cas est susceptible d'entraîner l'éjection de matière sous forme de gouttes secondaires. Au niveau de l'axe d'impact, la hauteur du matériau céramique diminue lors de l'étalement de la première goutte, puis augmente soudainement car elle correspond à l'arrivée de la seconde particule fluide. Puis la hauteur diminue et atteint une valeur supérieure à la hauteur minimale de la première goutte. De proche en proche, la hauteur du matériau sur l'axe d'impact montre un comportement cyclique mais à une hauteur de plus en plus importante. De même, sur l'axe d'impact, la hauteur augmente lors de la rencontre de la première série de goutte puis commence à diminuer lorsque le jet de matière

repart vers l'axe d'impact. La seconde série de gouttes, qui apportent de l'énergie cinétique, limite le retour de la matière vers l'axe d'impact et contribue à une seconde montée du jet sur l'axe de rencontre, plus haute que lors de la première série. Au fur et à mesure des impacts de gouttes suivantes, cette hauteur augmente en gardant une évolution cyclique.

4.7.1. La dynamique de formation de couches successives

Dès le début du contact entre le substrat et la première couche, les températures suivent l'évolution typiquement déjà observée. L'ajout d'une nouvelle couche chaude modifie l'évolution thermique : les températures de la première couche augmentent brusquement, et on observe entre la première et la deuxième couche, le comportement d'un contact brusque avec RTC, comme observer le substrat et la couche 1 au temps t=0.

Ainsi au fur et à mesure des impacts, les couches antérieures sont de moins en moins sensibles aux chocs de couches suivantes. Ce phénomène est également visible sur le substrat qui se réchauffe brusquement a l'impact de la première couche ; mais qui subi moins de variations de températures a l'impact de couches suivantes. Lorsque la température initiale des couches est supérieure à la température de fusion, le changement de phase intervient et modifie l'évolution des températures.

En effet, la première couche est en contact avec le substrat ce qui implique que le refroidissement et la solidification sont rapides. Lorsque la deuxième couche est déposée, elle entre en contact avec la première couche qui n'est pas totalement solidifiée.
Ce qui induit une vitesse de refroidissement plus faible. Comme la température de contact est supérieure a la température de fusion, la deuxième couche ne peu pas encore être solidifiée et réchauffe la couche précédente qui refond.

Lorsque le refroidissement se poursuit l'écart de température à l'interface est faible, de telle sorte que la vitesse de refroidissement est plus lente qu'entre la première couche et le substrat. Il en résulte que la solidification est plus lente puisque les échanges thermiques nécessitent plus de temps pour solidifier le milieu.

A chaque mise en place des couches suivantes, la température de substrat augmente mais avec une vitesse plus lente. En effet, les échanges thermiques entre les nouvelles couches chaudes et le substrat ne sont plus directs et la diffusion de la chaleur dans tout le système diminue la chaleur apportée au substrat. Il en résulte un réchauffement du substrat moins

important et plus lent. Ainsi, après plusieurs impacts, le substrat ne ressent plus l'apport thermique des nouvelles couches.

4.7.2. Influence de la fréquence d'impact

Les couches successives arrivent les unes après les autres à une fréquence donnée. La fréquence d'impact correspond à la vitesse d'apport d'énergie thermique. Plus elle est élevée, et plus le système reçoit de la chaleur rapidement.

Lorsque la fréquence d'impact des couches est élevée, l'apport de chaleur est tel qu'il limite la progression du front de solidification. En effet, le temps nécessaire à la diffusion de la chaleur dans le substrat froid et donc au refroidissement des couches est supérieur à l'intervalle de temps qui sépare l'impact de deux couches successives. Ainsi, lors de l'impact de la première couche, la solidification est initiée très rapidement, mais le système accumule de l'énergie ce qui interdit la progression de la solidification et finit par refondre la zone solidifiée lors de l'impact de la première couche.

Inversement, lorsque la fréquence d'impact est faible, l'apport d'énergie est plus espacé et le système a plus de temps pour diffuser la chaleur vers le substrat. Lors de la déposition d'une nouvelle couche, le front de solidification peut régresser par refusions partielle du matériau, puis la diffusion de la chaleur permet le refroidissement du système de couches et donc sa solidification : il n'y a donc pas accumulation de la chaleur et la position du front de solidification augmente. Cependant, au fur et à mesure des impacts successifs, la température du système augmente globalement, ce qui se traduit par une diminution de la vitesse de propagation du front de solidification.

L'intérêt du choix de la fréquence d'impact est de pouvoir globalement solidifier le système en refondant partiellement et périodiquement la surface du film afin de lisser l'état de surface du revêtement et de ce fait de minimiser la formation d’éventuels défauts susceptibles d’augmenter la porosité. Un compromis entre fréquence d’impact (vitesse d’apport de chaleur) et température du substrat (vitesse de refroidissement) permet donc non seulement de maitriser la hauteur de rencontre des gouttes et donc leur stabilisation, mais aussi de modifier la porosité du revêtement.

4.8. Conclusion

Lorsque la goutte de l'Alumine est en contact avec le substrat, elle se déforme et perd son aspect sphérique, en s'étalant plus ou moins largement sur le substrat. La particule cède son énergie au substrat après l'impact. La solidification intervient lorsque la goutte atteint une température inférieure à la température de fusion et contribue à figer plus rapidement la matière. La couche finale se stabilise après un temps plus ou moins long.

L'impact consécutif ou simultané de gouttes sur un substrat fait intervenir à la fois une dynamique complexe qui dépend de l'état du substrat et des échanges thermiques par apport successif d'énergie. Lors de l'impact de gouttes simultanées, l'énergie cinétique de chaque goutte est convertie partiellement en énergies de forces visqueuses et de surface et énergie cinétique d'étalement. Cette dernière, au moment de la rencontre de deux gouttes voisines, produit un jet de matière puis un retour du fluide vers le point d'impact initial sous forme d'une onde de retour. Ce mouvement se reproduit jusqu'à stabilisation de la matière, soit par solidification totale du matériau, soit par conversion de l'énergie cinétique du fluide. Lorsque la distance entre les deux gouttes est grande, l'apport d'énergie est plus lent et le système à plus de temps pour diffuser la chaleur vers le substrat. Par contre lorsque la distance entre les deux gouttes est petite, l'apport de chaleur limite le refroidissement et donc la progression de la solidification.

En modifiant les paramètres initiaux en termes de vitesse de particule fluide et de température de substrat ou de gouttes, il est possible de contrôler la morphologie des gouttes étalées et par l'étude d'impact d'un train de gouttes de contrôler la morphologie du revêtement final. Donc les études des paragraphes précédents ont montre que la dynamique des gouttes influence le comportement de solidification du matériau céramique. Réciproquement, la vitesse de solidification peut modifier la dynamique et par conséquent la structure du revêtement.

Les simulations ont été réalisées en 2D ce qui a permit de mettre en évidence une base pour la formation des lamelles et de ce fait les couches constituant le revêtement. De plus, certains phénomènes ne sont pas pris en compte dans la simulation numérique actuelle.

Il est donc nécessaire de compléter cette étude par d'autres simulations afin de bien quantifier les phénomènes intervenant à l'échelle de particules.

Chapitre 5

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

L’écrasement de particules métalliques ou céramiques sur un substrat par projection, plasma en vue de la fabrication d'un revêtement dense est un procédé industriel largement utilisé. Mais les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont encore que partiellement maîtrisés car les interactions entre ces particules fluides, la solidification ainsi que la refusions éventuelle par projection de gouttes sur les précédentes sont difficiles à analyser expérimentalement à cause des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la milliseconde et du millimètre. Il est donc nécessaire de faire appel à un outil numérique complexe pour prendre en compte les divers aspects physiques de cet écrasement. Les travaux menés ont eu tous pour objectif d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes dynamiques et thermiques qui se produisent à l'échelle de gouttes. Notre travail fait partie de l’ensemble de ces travaux.

On a abordé dans le premier chapitre les fondements et les principes de la projection thermique, spécialement l’APS, ainsi que les mécanismes et les phénomènes intervenant lors de la projection des particules céramiques sur un substrat solide ce qui est nécessaire à la compréhension et l’étude de l’influence des différents paramètres lors de la formation d’une lamelle et de ce fait du revêtement.

Le deuxième chapitre a fait l'objet de l'état de l'art sur le sujet de l'impact d'une goutte sur un substrat solide et les bases de la physique associée. Les phénomènes hydrodynamiques et thermiques qui interviennent dans le comportement d'une particule fluide isolée sont nombreux et suscitent encore de nos jours des interrogations. Outre la vitesse, le diamètre de la goutte et ses caractéristiques, l'interface entre la goutte et le substrat et avec l'air, sont des propriétés intrinsèques qui définissent le comportement de déposition ou d'éclatement (éclaboussure).

La deuxième partie de ce chapitre a été consacré à la description des principales méthodes numériques et les principaux modèles analytiques et numériques employées dans la littérature pour prendre en compte le caractère diphasique de l'évolution de gouttes étalées sur un substrat solide. Cependant ces modèles restent difficiles à intégrer dans des outils de

simulation numérique du procédé complet, en grande partie à cause du temps de calcul qu'ils nécessitent. Pour ce faire, les modèles actuellement proposés dans la littérature utilisent des lois analytiques ou dérivées de simulation numériques qui permettent de prédire le diamètre de la lamelle et son épaisseur en fonction des paramètres d'impact de la particule ou sa morphologie soit en 2-D ou 3-D, utilisant toujours les équations de Navier-Stokes.

Le troisième chapitre fait le point sur le modèle le plus souvent employé pour simuler l'impact de gouttes sur un substrat solide et la résolution numérique des équations correspondantes, qui a servi de base pour bien choisir les étapes de la procédure numérique utilisée pour notre simulation.

Dans le quatrième chapitre, les résultats de simulation sont réalisés en 2D cartésien tout d'abord sur l'impact d'une particule d'Alumine en fonction de sa vitesse d'impact puis de la température du substrat ensuite en fonction de l'angle de contact. Les résultats présentés montrent que lors de l'impact, l'énergie cinétique initiale est convertie plus ou moins rapidement en énergie de surface et en travail de forces visqueuses, et la couche finale se stabilise après un temps plus ou moins long. La solidification qui intervient lorsque la goutte atteint une température inférieure à la température de fusion contribue à figer plus rapidement la matière.

Par convection, le champ de température à l'intérieur de la goutte devient homogène et le front de solidification prend rapidement une forme plane. La solidification peut donc rapidement être considérée comme 1D. De plus, en figeant le matériau, la solidification diminue l'énergie cinétique du système. Afin d'analyser le comportement thermique de l'impact, une simulation a été réalisée sur la déposition de gouttes sur un substrat incliné de 60°. L'énergie cinétique de la particule est transformée en travail de déformation visqueuse puis en énergie de surface. L'étalement est alors contrôlé par des phénomènes mécaniques et thermiques.

L'impact consécutif ou simultané de gouttes sur un substrat fait intervenir à la fois une dynamique complexe qui dépend de l'état du substrat et des échanges thermiques par apport successif d'énergie. Lors de l'impact de gouttes simultanées, l'énergie cinétique de chaque goutte est convertie partiellement en énergies de forces visqueuses et de surface et énergie

cinétique d'étalement. Cette dernière, au moment de la rencontre de deux gouttes voisines, produit un jet de matière puis un retour du fluide vers le point d'impact initial sous forme d'une onde de retour. Ce mouvement se reproduit jusqu'à stabilisation de la matière, soit par solidification totale du matériau, soit par conversion de l'énergie cinétique du fluide. Lorsque la distance entre les deux gouttes est grande, l'apport d'énergie est plus lent et le système à plus de temps pour diffuser la chaleur vers le substrat. Par contre lorsque la distance entre les deux gouttes est petite, l'apport de chaleur limite le refroidissement et donc la progression de la solidification.

Dans le cas de l'impact consécutif de gouttes, au niveau de l'axe d'impact, la hauteur du matériau diminue lors de l'étalement de la première goutte, puis augmente soudainement car elle correspond à l'arrivée de la seconde goutte. La seconde goutte, qui apporte de l'énergie cinétique, limite le retour de la matière vers l'axe d'impact et contribue à une seconde montée du jet sur l'axe de rencontre, plus haute que lors de l'impact de la première goutte et aussi à un étalement plus marqué.

Lors de l'impact de gouttes identiques simultanément ou successivement, les simulations numériques ont montré que la hauteur du jet de rencontre est fonction de plusieurs paramètres. La distance entre les gouttes a une influence sur la hauteur du jet de rencontre et de ce fait sur le temps de stabilisation du film fin résultant. Ainsi, en modifiant les paramètres initiaux en termes de vitesse de particules fluides et de température de substrat ou de gouttes, il est possible de contrôler la morphologie du revêtement final.

En modifiant les paramètres initiaux en termes de vitesse de particule fluide et de température de substrat ou de gouttes, il est possible de contrôler la morphologie des gouttes étalées et par l'étude d'impact d'un train de gouttes de contrôler la morphologie du revêtement final. Les simulations ont été réalisées en 2D ce qui a permit de mettre en évidence une base pour l'étude détaillée de la formation des lamelles et de ce fait les couches constituant le revêtement. Des simulations 3D permettraient de quantifier la dynamique de formation du revêtement.

L'étude numérique de l'impact de gouttes ne permet pas en effet de tenir compte de tous les phénomènes thermiques et cinétiques qui interviennent. Les expériences ont pour but de

souligner les phénomènes qu'il serait intéressant de modéliser et d'ajouter à la simulation numérique. En ce sens, les résultats ne sont donc pas à la hauteur de nos attentes et il serait intéressant d'approfondir les études sur la modélisation de ces phénomènes.

Les perspectives de ce travail sont de façon immédiate la mise en place de la simulation en 3D de l'impact de gouttes, bien que cela nécessite un nombre de mailles très important et une taille mémoire conséquente. Cependant, l'analyse 2D des phénomènes a permis de donner un ordre de grandeur des dimensions à respecter ainsi que de localiser les zones où l'on devra porter notre attention. Certains phénomènes ne sont pas pris en compte dans la simulation numérique actuelle. Il est donc nécessaire de compléter cette étude par d’autres simulations afin de bien quantifier les phénomènes intervenant à l’échelle de gouttes :

- La résistance thermique de contact
- La surfusion à l’interface goutte substrat

De plus, il serait intéressant de poursuivre les investigations concernant l’impact d’un train de gouttes afin de modéliser correctement la formation de la première couche du revêtement puis la deuxième couche qui s’étale non pas sur un substrat solide mais sur une couche à morphe dont les caractéristiques physiques et chimiques sont très différentes de la première afin de pouvoir simuler la formation complète du dépôt à l’aide de ce code de calcul.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Vincent DEBOUT, Contribution à l'étude des propriétés optiques de dépôts plasma de Zircone Yttriée : Influences de leurs caractéristiques microstructurales et physico-chimiques, Thèse de doctorat en sciences des matériaux céramiques et traitements de surface, université de limoges, France, No d'ordre : 2007 limo006.

[2]Cyril BAUDRY, Contribution à la modélisation in stationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma, Thèse de doctorat en sciences des procédés céramiques et traitements de surface, université de limoges, France, No d'ordre : 2003 limo0063.

[3] David RIGOT, Contribution à l'étude de l'érosion des électrodes de torches à plasma d'arc pour la projection par suivi en ligne des signaux de tension et de son, Thèse de doctorat en sciences des procédés céramiques et traitements de surface, université de limoges, France, No d'ordre : 2003 limo0053.

[4] R.Ramadamy, V.Selvarajan, Heat transfer to single particle injected into a thermal plasma, computational materials science 15 (1999)265-274.

[5] M.P. Planche, R. Bolot, and C. Coddet, In-Flight characteristics of Plasma Sprayed Alumina Particles: Measurements, Modelling, and Comparison, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 12(1) march 2003-101.

[6] T. Klocker and T.W. Clyne, In-Flight Behaviour of Dense and Hollow Particles during Plasma Spraying: Part I- A Numerical Model, Journal of Thermal Spray Technology, January 2003.

[7] X. Jiang, J. Matejicek, S. Sampath, Substrate Temperature Effects On The Splat Formation, Microstructure Development And Properties Of Plasma Sprayed Coatings, Part II: Case Study for Molybdenum, Materials science and engineering A272 (1999) 189-198.

[8] H. Zhang, X.Y. Wang, L.L. Zheng, X.Y. Jiang, Studies of Splat Morphology and Rapid Solidification during Thermal Spraying, International Journal of Heat And Mass Transfer 44 (2001) 4579-4592.

[9] He- Ping Li, and E. Pfender, Examination of Substrate Surface Melting, Induced Splashing During Splat Formation In Plasma Spraying, Three Dimensional Modelling of Plasma Spray Process, JTTEE 5 16:245-260(DOI:10.1007) 2006.

[10] Sofiane GUESSASMA, optimisation et contrôle de procédés de projection thermique par coopération de méthodes d'intelligence artificielle, Thèse de doctorat en sciences pour l'ingénieur, université de technologie de Belfort - Montbéliard, France, No d'ordre : 006 année 2007.

[11] P.V Ananthapadmanabhan, T.K. Thiyagarajan, K.P. Sreekumar, R.U. Satpute, N. Venkatramani, K. Ramachandran, co-spraying of alumina-titania: Correlation of Coating

Composition and Properties with Particle Behaviour In The Plasma Jet, Surface And Coatings Technology 168 (2003) 231-240.

[12] Thibaut HAURE, Couches Multifonctionnelles Par Procédé Multi Technique, Thèse de doctorat en sciences des procédés céramiques et traitements de surface, université de limoges, France, thèse: 2003 limo0064.

[13] Laamraoui HAMLAOUI, Applications des Matériaux Céramiques en Métallurgie, Thèse de Magister en Physique des Matériaux métalliques et Semi-Conducteurs, Université de Batna; Algérie, Juin 2008.

[14] D. Goberman, Y.H. Shohn, L. Shaw, E. Jordan, M. Gell, Microstructure Development of Al_2O_3- 13wt.%TiO_2 Plasma Sprayed Coating Derived from Nanocrystalline Powders, Acta Materialia 50(2002) 1141-1152.

[15] P. Fauchais, Understanding Plasma Spraying, J. Phys. D: Appl. Phys. 37(2004) R86-R108.

[16] Pierre Fauchais, Ghislain Montavon, Michel Vardelle, Julie Cedelle, Developments in Direct Current Plasma Spraying, Surface & Coatings Technology 201 (2006) 1908-1921.

[17] P. Fauchais, A. Vardelle, Heat, Mass and Momentum Transfer in Coating Formation by Plasma Spraying, Int. J. Therm. Sci. (2000) 39, 852-870.

[18] Mohamed BOUNEDER, Modelisation Des Transferts de Chaleur et De Masse dans Les Poudres Composites Métal/Céramique en Projection Thermique : Application A La Projection Par Plasma D'arc Souffle Argon Hydrogène, Thèse de Doctorat En Sciences des Matériaux Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, Thèse N°23-2006.

[19] M. Fadhel BEN ETTOUIL, Modélisation Rapide Du Traitement De Poudres En Projection Par Plasma D'arc, Thèse De Doctorat en Sciences des Matériaux Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, Thèse N°8-2008.

[20] Julien PATRU, Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircone et d'Acier, Thèse de Doctorat en Sciences des Matériaux Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, Thèse N°64-2005.

[21] Renouard VALLET, Elaboration par projection plasma d'électrolytes de Zicrone Yttriée Denses et de Faible épaisseur pour SOFC, Thèse de Doctorat en Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, Thèse N°2-2004.

[22] Aurélien TRICOIRE, Barrières Thermiques Fissurées Verticalement par Projection Plasma pour Applications Aéronautiques : Compréhension des Phénomènes, Réalisation et Caractérisation des Dépôts, Thèse de Doctorat en Sciences des Matériaux Céramiques et Traitements de Surfaces (UMR 6638), Université de Limoges, France, Thèse N°52-2005.

[23] M. Khalid FATAOUI, Développement de Modèles Thermiques de Construction de Dépôts Obtenus par Projection Thermique, Modèle Mécano Thermique de l'Etalement de la Gouttelette, Thèse de Doctorat en Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface (UMR 6638), Université de Limoges, France, Thèse N°74-2007.

[24] Sébastien BEAUVAIS, Etude de l'Influence de la Porosité sur les Propriétés Electriques de Dépôts Réalisés par Projection Plasma, Thèse de Doctorat en Sciences et génie des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, juillet-2003.

[25] M. Mellali, P. Fauchais, A. Grimaud, Influence of Substrate Roughness and Temperature on the Adhesion/Cohesion of Alumina Coatings, Surface & Coatings Technology 81 (1996) 275-286.

[26] S. Sampath, X.Y. Jiang, J. Matejicek, A.C. Leger, A. Vardelle, Substrate Temperature on Splat Formation, Microstructure Development and Properties of Plasma Sprayed Coating Part I: Case Study for Partially stabilized Zicronia, Materials Science and Engineering. A272 (1999) 181-188.

[27] André McDonald, Christian Moreau, Sanjeev Chandra, Thermal Contact Resistance between Plasma-Sprayed Particles and Flat Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 1737-1749.

[28] A.A. Syed, A. Denoirjean, B. Hannoyer, P. Fauchais, P. Denoirjean, A.A. Klan, J.C. Labbe Influence of Substrate Surface Conditions on the Plasma Sprayed Ceramic and Metallic Particles flattening, Surface & Coatings Technology 200 (2005) 2317-2331.

[29] Rajneesh Bhardwaj, Jon P. Longtin, Daniel Attinger, A numerical Investigation on the Influence of Liquid Properties and Interfacial heat Transfer during Microdroplet Deposition onto a Glass substrate, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 2912-2923.

[30] Eric LEGROS, Contribution à la Modélisation Tridimensionnelle du procédé de Projection par Plasma et Application a un Dispositif a deux Torches, Thèse de Doctorat en Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, Thèse 2003 limo0066.

[31] S. Sikalo, H.D. Wilhelm, I. V. Roisman, S. Jakirlic, and C. Tropea, Dynamic Contact Angle of Spreading Droplets: Experiments and Simulations, Physics of Fluids 17,1 (2005)

[32] Cédric Le Bot, Eric Arquis, Didie Delaunay, Impact et Solidification de Gouttes de Métal sur Substrat, 16ème Congres Français de Mécanique, Nice, 1-5 sept 2003.

[33] J. Mostaghimi, Modeling Droplet Impact in Plasma Spray Process, Pure & Appl. Chem., Vol. 70, No.6, pp.1209-1215,1998.

[34] Yamina MEBDOUA, Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du Dépôt, Thèse de Doctorat en Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, Aout-2008.

[35] M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandra, J. Mostaghimi, Deposition of Tin Droplets on a Steel Plate: Simulations and Experiments, International Journal of Heat and Mass Transfer 41 (1998) 2929-2945.

[36] Julie Cedelle, Fahmi Loghmari, Christophe Lyphout, Dominique Gobin, and Armelle Vardelle, Spreading and Solidification of Droplets Impacting on a Substrate under Thermal Spray Conditions, EUROTHERM 82, Numerical Heat Transfer 2005.

[37] Syed Asif ANSAR, Co-Projection d'Alumine et d'Acier Inoxydable par Plasma d'Arc, Thèse de Doctorat en Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, France, NO d'ordre 3-2004.

[39] Cédric Le Bot, Stéphane Vincent, Eric Arquis, Impact and solidification of Indium Droplets on Cold Substrate, International Journal of Thermal Sciences 44 (2005) 219-233.

[40] Rabindra BHOLA, Impact and freezing of molten Tin droplets on solid surface, Thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Canada, 1997.

[41] J. MADEJSKI, Solidification of Droplets on Cold Surface, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 19, pp. 1009-1013. Pergamon Press 1976.

[42] Chang-Jiu Li, Han-Lin Liao, P. Gougeon, G. Montavon, C. Coddet, Experimental Determination of the Relationship between Flattening degree and Reynolds Number for Spray Molten Droplets, Surface & Coatings Technology 191 (2005) 375-383.

[43] R.BHOLA, S. CHANDRA, Parameters Controlling Solidification of Molten Wax Droplets Falling on a Solid Surface, Journal of Material Science 34 (1999) 4883-4894.

[44] T. WATANABE, I. KURIBAYASHI, T. HONDA and A. KANZAWA, Deformation and solidification of a Droplet on a Cold Substrate, Chemical Engineering Science, Vol.47, No.12, pp.3059-3065, 1992.

[45] E. Lugscheider,C. Barimani, P. Eckert, U. Eritt, Modelling of the APS Plasma Spray Process, Computational Material Science 7 (1996) 109-114.

[46] A.S. Moita and A.L. Moreira, The Dynamic Behaviour of Single Droplets Impacting onto a Flat Surface, ILASS-Europe 2002, zaragoza.

[47] Rajeev Dhiman, Sanjeev Chandra, Freezing-induced Splashing During Impact of Molten Metal Droplets with Weber Numbers, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 5625-5638.

[48] Y.P. Wan, H. Zhang, X.Y. Jiang, S. Sampath, V. Prasad, Role of Solidification, Substrate Temperature and Reynolds Number on Droplet Spreading in Thermal Spray Deposition: Measurements and Modelling, Journal of Heat Transfer 382, Vol. 123, April 2001.

[49] H. Zhang, Theoretical Analysis of Spreading and Solidification of Molten Droplet during Thermal Spray Deposition, International Journal of Heat and Mass Transfer 42 (1999) 2499-2508.

[50] M. Xue, J. Mostaghimi, S. Chandra, Prediction of Coating Microstructure, the Conference of International Thermal Spray, Osaka, Japan, May 10-12, 2004

[51] R. Dhiman, André G. MacDonald, S. Chandra, Predicting Splat Morphology in a Thermal Spray Process, Surface & coatings Technology 201 (2007) 7789-7801.

[52] Pasandideh-Fard, J.Mostaghimi, On the spreading and solidification of molten particles in a plasma spray process : effect of the thermal contact resistance, Plasma chem, plasma proc, 1996 Vol. 16(1),pp.83s-68s.

[53] Pasandideh-Fard, J.Mostaghimi, Deposition of tin droplet on a steel plate: simulation and experiment, Int.J.heatmass transfer 1998, Vol.41,pp2929-2945.

[54] A.Bertagnoli, M.Marchese, M.Jeccuci, G.Doltsinis, I.St.Noelting, Thermomechanical simulatio of splashing of ceramic droplets on a grid substrate, journal of computational physics, Vol.133,pp.205-221.

[55] M. Pasandideh-fard, S.D. Aziz, S. Chandra, J. Mostaghimi, Cooling Effectiveness of a Water Drop Impacting on a Hot Surface, International Journal of Heat and Fluid Flow 22 (2001) 201-210.

[56] Y.K.Chae, J.Mostaghimi, T.Yoshida, Deposition and solidification process of super-cooled droplet impacting on the substrate under plasma spraying conditions, science and technology of advanced materials 1 (2000) 147-156.

[57] X.Y. Wang, H. Zhang, L.L. Zheng, S. Sampath, An Integrated Model for Interaction between Melt Flow and Non- Equilibrium Solidification in Thermal Spraying, International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 2289-2301.

[58] Javad Mostaghimi, S. Chandra, Splat Formation in Plasma-Spray Coating Process, Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 3, pp.441-445, 2002.

[59] M.Bussmann, S.Chandra, and J. Mostaghimi, Modelling the Splash of a Droplet Impacting a Solid Surface, Physics of Fluids, Vol. 12, Nr 12, Dec 2000.

[60] M. Pasandideh-fard, S. Chandra, J. Mostaghimi, a Three - Dimensional Model of Droplet Impact and Solidification, International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 2229-2242.

[61] V. Mehdi-Nejad, J. Mostaghimi ,and S.Chandra, Air Bubble Entrapment Under an Impacting Droplet, Physics of Fluids, Vol. 15, Nr 1, Jan 2003.

[62] R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi and S. Chandra, Numerical Study of Impact and Solidification of a Droplet Over a Deposited Frozen Splat, International Journal of Computational Fluid Dynamics, February 2004, Vol. 18(2),pp.133-138.

[63] M. Pasandideh-fard, J. Mostaghimi and S. Chandra, on a three-Dimensional Model of Free Surface Flows with Heat Transfer and Solidification, Proceeding of the 3rd ASME/JSME joint Fluids Engineering Conference July 18-23, 1999, San Francisco, California.

[64] S. Kamnis and S. GU, Numerical Modeling of Droplet Impingement, J. Phys. D: Appl. Phys. 38(2005) 3664-3673.

[65] M. Raessi, J. Mostaghimi, M. Bussmann, Effect of Surface Roughness on Splat Shapes in the Plasma Spray Coating Process, Thin Solid Films 506-507 (2006) 133-135.

[66] M. Pasandideh-fard,V. Pershin, S. Chandra ,and J. Mostaghimi, Splat Shapes in a Thermal Spray Coating Process: Simulations and Experiments, Journal of Thermal Spray Technology 206- Vol. 11(2) June 2002.

[67] H.B. Parizi,L. Rosenzweig, J. Mostaghimi, S. Chandra ,T. Coyle, H. Salimi, L. Pershin, A. McDonald, and C. Moreau, Numerical Simulation of Droplet Impact on Patterned Surfaces, Journal of Thermal Spray Technology 713- Vol. 16(5-6) Dec 2007.

[68] Siddhartha F. Lunkad, Vivek V. Buwa, K.D.P. Nigam, Numerical Simulations of Drop Impact and Spreading on Horizontal and Inclined Surfaces, Chemical Engineering Science 62 (2007) 7214-7224.

[69] Stéphanie Delage Santacreu, Méthode de raffinement de maillage adaptatif hybride pour le suivi de fronts dans les écoulements incompressibles, thèse de doctorat, université de Bordeaux I, N°d'ordre : 3191(2006).

[70] S.V. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York (USA), 1980.

[71] Stéphane VINCENT, Modélisation d'écoulements incompressibles de fluides non-miscibles, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur université de Bordeaux, N°2148(1999).

[72] Cédric Le bot, eric Arquis, Numerical study of the solidification of successive thick metal layers, international journal of thermal sciences, 48(2009) 412-420.

[73] Java Mostaghimi, Mohammad Pasandideh-Fard and Sanjeev Chandra, Dynamics of Splat Formation in Plasma Spray Coating Process, Plasma Chemistry and Plasma Processing. Vol. 22, No1, March 2002.

[74] Steven Dufour, méthodes d'éléments finis adaptatives pour les écoulements multi fluides, université de Montréal, thèse doctorat, 1999.

[75] Markus Bussman , A three dimensional model of an impacting droplet, Graduate department of mechanical and industrial engineering, university of Toronto 2000.

[76] Kadid Abdelkrim, Analyse linéaire par éléments finis des plaques en bétons armé soumise aux explosions, thèse de doctorat, université de Batna faculté des sciences de l'ingénieur.