REPUBLIQUE **A**LGERIENNE **D**EMOCRATIQUE **P**OPULAIRE
Ministère **D**e **l'**Enseignement **S**upérieur
Et de la **R**echerche **S**cientifique
Université Dr –YAHIA FARES de MÉDÉA



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique
Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master
En Génie mécanique
Option: Construction mécanique

Thème

Étude numérique par interaction fluide structure de l'effet de l'oxydation sur l'aplatissement des gouttelettes sur substrat lors de la formation de lamelle.

Présenté par :

HOCINE Anouar
MECHTI Messaoud

Proposé et Dirigé par :

Encadreur : Dr. TAHAR Souad

Co-Encadreur : Dr. ZIRARI Mounir

Promotion Juin 2022

Remerciements

Louange et remerciements à Allah, le tout puissant qui nous a donné la volonté, l'aide, la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements au **Dr TAHAR.S** qui a accepté de nous encadrer et qui nous a fait bénéficier de son savoir et de ses conseils éclairés afin de perfectionner ce travail.

A notre Co-encadreur **Dr ZIRARI.M** d'avoir accepté de diriger ce travail de mémoire. Merci pour votre disponibilité, votre patience et vos encouragements, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer. Trouve dans ce travail l'expression de notre respect et de notre gratitude. Vous nous faites l'honneur de juger ce travail.

Dédicaces

*A mes très **CHERS PARENTS**. Aucune phrase, aucun mot ne saurait exprimer àsa juste valeur le respect et l'amour que je vous porte.*
Vous m'avez entouré d'une grande affection, et vous avez été toujours pour moi un grand support dans mes moments les plus difficiles. Sans vos précieux conseils,vos prières, votre générosité, je n'aurai pu surmonter le stress de ces longuesannées d'études. Vous êtes pour moi l'exemple de droiture, de lucidité et depersévérance.
A mes frères et ma sœur

A toute ma grande famille

A mes amis KARIM.MARWAN et ABDERRAHIM et DAOUD.

****

Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail : A L'être le plus cher de ma vie, Ma mère et à défunt père Allah yarhmo grâce à eux j'ai atteint mon objectif.

Et un grand salut à Mon petit ange Fathi et Mimi, mes chers frères, et mes chères sœurs, et ma grande famille.

A tous mes chers amis :Mustapha, Dawad, Fares,Reda, Moncef, Saado.

A Tout ceux qui m'aiment et que j'aime.

MESSAOUD & ANOUAR

ملخص **: دراسة عددية عن طريق تفاعل بنية السوائل لتأثير الأكسدة على تسطيح القطرات على الركيزة أثناء تكوين الصفيحة**

يعتمد نجاح وعمر رواسب البلازما بشكل كبير على جودة الالتصاق بين الرواسب والركيزة أو بين الصفائح التي تشكل الرواسب والتي تتشكل من تأثير جزيئات المسحوق التي تصطدم بالركيزة. لذلك ، في هذا العمل ، نقترح محاكاة سحق جسيم الألومينا المنصهر جزئيًا على ركيزة فولاذية لأداة H13 بطبقة أكسيد ، باستخدام تقنية تفاعل السوائل الهيكلية IFS ، وطريقة العناصر المحدودة وحجم السائل (VOF). بهدف فهم أفضل للظواهر المتعلقة بالسلوك الميكانيكي في واجهة الجسيمات الركيزة أثناء تكوين الصفيحة. يتنبأ بمورفولوجيا الصفيحة والتناثر المحتمل أثناء التكاثر. تمت مقارنة النتائج مع نتائج محاكاة المؤلفين الآخرين ، التي تم الحصول عليها في ظل نفس الظروف. بفضل هذه الدراسة ، وجد أنه بالإضافة إلى سمك طبقة الأكسيد ، فإن النسبة المئوية لحالة الانصهار الموجودة في الجسيم تعمل بشكل مباشر على انتشار وتصلب الصفائح المتكونة.

الكلمات المفتاحية : الترسيب ، الصفيحة ، التأثير ، حجم الجسيمات ، الركيزة ، FSI، VOF ، تغيير الطور ، الحرارة النوعية المكافئة ، العناصر المحدودة .

Résumé : Étude numérique par Interaction fluide structure de l'effet de l'oxydation Sur l'aplatissement des gouttelettes sur substrat lors de la formation de lamelle

Le succès et la durée de vie des dépôts plasma dépendent, en grande part, de la qualité de l'adhérence entre le dépôt et le substrat ou entre les lamelles qui constituent le dépôt et qui sont formées par l'impact des particules de poudre qui s'écrasent sur le substrat. Par conséquent, dans ce travail, on propose de simuler numériquement l'écrasement d'une particule d'alumine partiellement fondue sur un substrat en acier à outil H13 présentant une couche d'oxyde, en utilisons la technique d'interaction fluide structure IFS, la méthode des élément finis et la méthode de volume of fluide (VOF) dans l'objectif de mieux comprendre les phénomènes liés aux comportements mécaniques à l'interface particule substrat pendant la formation de lamelle. Il prédit la morphologie de lamelle et d'éventuelles éclaboussures pendant la propagation. Les résultats ont été comparés aux résultats des simulations d'autres auteurs, obtenu dans les mêmes conditions. Grâce à cette étude, il a été constaté qu'en plus de l'épaisseur de la couche d'oxyde le pourcentage de l'état de fusion présent dans la particule agit directement à l'étalement et la solidification de lamelles formés.

Mots clés : Dépôt, lamelle, impact, taille de particule, substrat, FSI, VOF, changement de phase, chaleur spécifique équivalente, éléments finis,

Abstract: **Numerical study by fluid structure interaction of the effect of oxidation on the flattening of droplets on substrate during lamella formation**

The success and lifespan of plasma deposits depend largely on the quality of the adhesion between the deposit and the substrate or between the lamellae which constitute the deposit and which are formed by the impact of the powder particles which crash into the substrate. Therefore, in this work, we propose to numerically simulate the crushing of a partially molten alumina particle on a H13 tool steel substrate with an oxide layer, using the structure fluid interaction technique IFS, the finite element method and the volume of fluid (VOF) method with the aim of better understanding the phenomena related to mechanical behavior at the particle-substrate interface during lamella formation. It predicts lamella morphology and possible spattering during propagation. The results were compared with the results of the simulations of other authors, obtained under the same conditions. Thanks to this study, it was found that in addition to the thickness of the oxide layer, the percentage of the fusion state present in the particle acts directly on the spreading and solidification of the lamellae formed.
Keywords: Deposition, lamella, impact, particle size, substrate, FSI, VOF, phase change, equivalentspecificheat, finiteelements.

Liste des figures :

Figure I.1 : Schéma de principe de la projection par plasma d'arc [12]…….....……..….6

FigureI.2 : Formation d'un dépôt par projection plasma[39]……...…….……15

Figure I.3 : Influence des coefficients de dilatation thermique sur les contraintes résiduelles…….....17

Figure I.4: Formation des Contraintes Résiduelles de Traction [39]……...…….....18

Figure I.5: Formation Des Contraintes Résiduelles De Compression [40]……...……..18

Figure I.6 : Représentation Des Contraintes Résiduelles De Cisaillement [40]…..……..19

Figure II.1: Les différents modes d'impact……...……27

Figure II.2 : Mécanisme d'étalement des lamelles……...…….33

Figure II.3 : Schéma d'étalement d'une goutte [60]……...…....33

Figure II.4: Les Composants de Contrainte Agissant Sur un Cube Elémentaireen DirectionsPrincipales……..…..…..42

Figure II.5: Les Composantes des Contraintes Agissant Sur un Cube Elémentaire: (Projection Sur Le Plan X.Y)…….……...….44

Figure III.1 : Description Des Eléments Avec Le Nombre Des Nœuds (Linéaires, Surfaciques, Et Volumiques)[66]……..…….……48

Figure: III .2 Algorithme de solution pour le couplage unidirectionnel et bidirectionnel fort [68]……...…….……...54

Figure IV.1 Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS…….57

Figure IV.2 Configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification…….60

Figure IV.3 Impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm Diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat En acier initialement……..61

Figure IV.4 Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions……62

Figure IV.5 Schéma de description du domaine d'application……....62

Figure IV.6 Comparaison entre les facteurs d'impact pour les quatre cas……..…..…65

Figure IV.7 Comparaison entre les profils de température avec le temps au

Point de contact pour les 4 cas.....65

Figure IV.8 Comparaison de la variation de la pression au point d'impact
Pour les quatre cas.....67

Figure IV.9 Comparaison de la variation de la pression au point d'impactPour les quatre cas.
……...68

Figure IV.10 Déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas…….....68

Figure IV.11 Von messes stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps...…….68

Liste des tableaux

Tableau IV.1 Les prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés[69]..…….……59

Tableau IV.2 Représentation spatiale du refroidissement de la particulePendant la formation des lamelles……...…64

Tableau IV.3 Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat préchauffé etpréoxydé……....66

Tableau IV .4 : Déformation au point d'impact dans le temps pour les Quatre cas……...67

Liste des symboles

A	Surface de Particule	$\mathbf{m^2}$
$\mathbf{a_2}$, $\mathbf{a_2}$, $\mathbf{a_3}$	Constante d'Eluer et Gear	-
$\mathbf{a_e}$,$\mathbf{a_w}$,$\mathbf{a_p}$	Constantes de la Méthode des Volume Finie	-
$\mathbf{b_i}$	Nombre de Biot	-
Br	Terme de Brinkaman	-
C	Fonction Couleur	-
Cp	Chaleur Spécifique	J/kg.K
CD	Coefficient de Traînée Corrigé	-
CD,C	Coefficient de Traînée	-
Cs ,Ct,Cm	Constantes de la Force Thermophorèse	-
D	Diamètre de la Particule Etalée	M
Di	Coefficient de Diffusion de L'espèce	-
Dp	Diamètre de la Particule	m
E	Champ Electrique	$\mathrm{V.m^{-1}}$
Ek	L'énergie Cinétique	J
Ep	L'énergie Potentielle	J

F	Rapport de la Surface réelle de Contact à la Surface Nominale du Solide	-
FTS	Forces de Tension de Surface	N
FB	Force D'histoire de Basset	N
FD	Force de Traînée	N
Fem	Force de Lorentz	$N.m^{-3}$
Fg	Force de Gravite	N
Fma	Force de Masse Ajoutée	N
Fth	Force Thermique	N
Fx, fy et fz	Composantes du Vecteur Force par Unité de Masse	N/m^3
G	Accélération de la Pesanteur	m/s^2
Gk	Terme de Production de L'énergie Cinétique Turbulente	-
H	Enthalpie	J/kg
H	Coefficient de Convection	$W/m^2.K$
ΔHF	Chaleur latente de fusion	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Δh_{vap}	Chaleur latente de vaporisation	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
I	Intensité Turbulente	-

K	Energie Cinétique Turbulente	m^2/s^2
kB	Constante de Boltzman	-
Ke	Conductivité Effective	$m^2 kgs^{-2} k^{-1}$
Kn	Nombre de Knudsen	-
Kn*	Nombre de Knudsen Modifiée	-
K	Conductivité Thermique	W/m.K
k_s	Conductivité Thermiques du Substrat	W/m.K
k_g	Conductivité Thermiques de la goutte	W/m.K
$k_{liquide}$	Conductivité Thermiques de liquide	W/m.k
K	Conductivité thermique moyenne du Plasma	W/m.K
Lx , Ln ,Lc	Echelle de Longueur	-
l_{pi}	Chaleur Latente de Fusion	$J.kg^{-1}$
Lf	Travail de Dissipation Visqueuse	-
Lm	Chaleur Latente de Solidification de la Particule	-
L	Longueur efficace du jet plasma	m

-

M	Masse	Kg
M	Masse du Mélange	Kg
Nu	Nombre de Nusselt	-
P	Pression Statique	Pa
Pi	Pression Partielle du Constituant i	Pa
$\mathbf{p_{tot}}$	Pression Totale	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Flux Thermique	$W.m^{-2}$
$\mathbf{Q_{em}}$	Chaleur Fournie par Effet Joule	J
$\mathbf{Q_{fusion}}$	Chaleur de fusion	J/kg
Ra	Rugosité de Surface	-
Re	Nombre de Reynolds	-
Rsl	Position de L'interface Solide-Liquide	M
Rth	Résistance Thermique de Contact	$m^2.K/W$
Sc	Nombre de Schmidt	-
SH	Terme Source Enthalpique	-
St	Nombre de Stefan	-
Sij	Tenseur des Déformations	-

	Symétriques	
$\mathbf{s_{\emptyset}}$	Terme Source	-
T	Temps	s
T	Température	K
ΔT	Gradient de température de couche Limite	K
Ur	Vitesse relative Entre le Fluide et la Particule.	m/s
u, v, w	Composants Cartésiennes du Vecteur Vitesse	m/s
$\boldsymbol{\vartheta_{pl}}$	Vitesse du front de changement de phase solide-liquide	$m.s^{-1}$
$\boldsymbol{\vartheta_{lv}}$	Vitesse du front de changement de phase liquide-vapeur	$m.s^{-1}$
Θ	L'angle de contact	rad
$\emptyset_1$,$\emptyset_2$	Fonctions phase	-
Γ	Tension superficielle	N/m

Table des matières

Introduction générale ……1

Chapitre I Étude Bibliographique

Introduction……...….8

I.1- Historique de la projection thermique……..8

I.1.1- Projection par plasma d'arc soufflé (APS) ….…….…..8

I.1.2. Description de l'arc électrique créé et formation du jet plasma 9

I.2 - Interactions plasma-particules.…….…….9

I.3- Adhésion des revêtements sur substrat rugueux……..……..…….11

I.3.1- Notion d'adhésion.……..……11

I.3.2.1 Adhérence mécanique…….....12

I.3.2.2 Théorie de la diffusion.……..13

I.3.2.3 Liaisons atomiques ou moléculaires……..13

I.4Préparation de surface, rugosité et adhésion …….…...13

I.4.1 Modification morphologique de la surface par abrasion…….....14

I.4.2Structuration de surface par laser…….....14

I.5Les essais d'adhérence…….....14

I.5.1 Essais mécaniques utilisés pour la mesure de l'énergie d'adhérence……..14

I.6Construction d'un dépôt projeté plasma…….....14

I.7Les contraintes résiduelles.....16

I.7.1Les contraintes à l'échelle microscopique…….16

I.7.2 Les contraintes d'origine métallurgique …….16

I.7.3Les contraintes thermiques ……..……..…….....16

I.8Domain d'application……..……..…….…….....20

I.8.1 Protections contre l'usure…….……...20

I.8.1.1 Usure par corrosion……...…….…...21

I.8.1.2 Usure par fretting…….……21

I.8.1.3 Usure par frottement…….……21

I.8.1.4 Usure par abrasion……21

I.8.2 Protection contre la corrosion……...22

I.8.2.1 Corrosions humides……...22

I.8.2.2 Corrosion sèche……..…...22

I.8.3 Application aéronautiques……...23

Conclusion……23

Chapitre II modélisation mathématique

Introduction…….....25

II.1. Comportement des particules fondues à l'impact…….26

II.1.1. La Lamelle (splat)…….....26

II.1.2 Transfert de chaleur……...……...27

II.1.2.1Fusion : Problème de Stefan…….....28

II.2. Couplage avec la dynamique de la particule……...……..29

II.3 Etalement de la particule……...…32

II.3.1 Le degré d'étalement maximal d'une goutte……....33

II.3.2 Solidification……...38

II.4 Interaction particule-structure……39

II.4.1Contrainte et déformation effectives……39

II.4.2 Le travail…….....42

II.4.3 Les équations d'équilibre……43

Conclusion……45

Chapitre III :Résolutions Numériques

Introduction……..……....46

III .1 Résolutions Numériques……..……46

III .1.1 La méthode des volumes finis……..……46

III .1.2 La méthode des éléments finis(MEF)……..…….47
III .1.3 Approche lagrangienne…….....48
III .1.4Approche eulérienne…….……50
III .2 Interaction entre particule-structure…….……....52
III .2 .1 Méthodes de Couplage…….....52
Conclusion…….…...54

Chapitre IV Résultats et discussion

Introduction ……...…….....…...54
IV.1 ANSYS ……..…..54
IV.1.1 Les points forts des outils ANSYS……...54
IV.1.2 Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux.……...…. ..54
IV.1.3 Schéma de logiciel ANSYS……..……...55

IV.2Matériaux utilisés…….…..…56
IV.2.1 l'aluminium.……....56
IV.2.2Propriétés des particules à l'impact……....56

IV.3 Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue ……..57
IV.3.1 Identification …….57
IV.4 Impact d'une particule d'aluminium partiellement fondue ……60
IV.4.1 Description du domaine d'application ……..…60
Conclusion générale…….....70
Référence ……73

INTRODUCTION GENERALE

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. 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 permis 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.

L'interaction fluide-structure (IFS) s'intéresse au comportement d'un système constitué par deux entités mécaniques considérées comme distinctes : une structure mobile (rigide ou déformable) et un fluide (en écoulement ou au repos) autour ou à l'intérieur de la structure. L'évolution des deux entités dépendant l'une de l'autre, un phénomène de couplage apparaît. Plus précisément, le mouvement de la structure est influencé par l'écoulement du fluide à travers les efforts transmis à l'interface, et, réciproquement, le mouvement de la structure influence l'écoulement du fluide par les déplacements de l'interface qui entraîne le fluide dans son mouvement.

Nombreuses études, expérimentales et numériques, ont amélioré la compréhension de l'écoulement des particules liquides. Tels que, Mekhetiche [1] qui a étudié l'étalement et la solidification d'une particule d'alumine sur un substrat en acier inoxydable dans les conditions de projection plasma. Où l'étude est menée en utilisant la méthode interaction fluide-structure (FSI). A pour objectif de déterminer les caractéristiques mécaniques à l'interface des particules de substrat lors du laminage ; Les résultats obtenus montrent que la variation des paramètres du phénomène du jet de plasma et l'impact des gouttes (présence de vide, angle d'injection) jouent un rôle très important dans ce problème.

Une méthode éléments finis est utilisée pour simuler le dépôt du processus de revêtement par projection thermique. Zirari et al [2]. Un ensemble d'équations gouvernantes est résolu par une méthode de volume de fluide (VOF). La méthode de la chaleur spécifique (SHM) est utilisée Pour le phénomène de solidification. Des particules d'aluminium complètement fondues ou semi-fondues impactent un substrat en acier à outils H13 sont étudiées. Les résultats du modèle sont en bon accord avec d'autres expériences et les données numériques précédentes. Ils ont montré que, pour les impacts normaux et inclinés, il est possible de constater que la morphologie d'éclaboussure dépend de son état de fusion. De plus, la particule partiellement fondue se comporte différemment de la particule complètement fondue. D'autre étude qualitative est consacrée à l'effet des paramètres de dispersion de la poudre en sortie de l'injecteur sur le traitement d'une particule isolée et sur la construction du dépôt Benettouili et al [3]. Ont trouvé que le traitement dynamique et thermique de la particule isolée est en bon accord avec ceux de la littérature. Ajoutant une étude repose essentiellement sur l'hypothèse que la solidification d'une lamelle ne commence que lorsque l'étalement est terminé Mebdoua [4]. Où les calculs numériques effectués montrent que l'angle de contact formé entre le germe et la surface du substrat est un paramètre clé qui affecte la température de nucléation et la densité des germes. Ces calculs ont été comparés

aux résultats expérimentaux, cette comparaison conduit à une évaluation de l'angle de contact réel entre 60 et 80 degrés. Un bon contact thermique entre la lamelle et le substrat, est caractérisé par une résistance de contact de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-7} m². Alors qu'un mauvais contact thermique de 10^{-6} m². Une autre étude a pour objet d'étudier des phénomènes mécaniques et thermiques lors de l'impact de gouttes de métal chaudes sur un substrat solide sec froid par simulation numérique et par analyse expérimentale le bot [5]. Les résultats sont exprimés sous forme de hauteur du jet de rencontre de deux gouttes voisines en fonction de la contribution des énergies cinétique et de surface, du travail des forces visqueuses et du travail nécessaire à la solidification, au travers des nombres de Reynolds, de Weber et de Stefan. Par ailleurs, l'impact d'une particule de métal entièrement fondu sur la surface est simulé par Aalami et al [6]. Il a été révélé que l'étendues de déformation et le profil de pression ont évolué au cours de l'éclaboussure et ont été modifiés par les variations de contrainte–déformation et pression-densité du matériau, en particulier pour prédiction de l'étendue du matériau au moment initial du processus d'éclaboussure. De plus, les particules impactées à une vitesse plus élevée sont plus étendues à un temps plus court.

Par une autre vue, les simulations bidimensionnelles entièrement résolues d'un tel problème par une méthode de suivi de front/différences finies Duyab [7]. Du fait de la gravité, la goutte de liquide supposée coller à la paroi froide se déplace vers le bas lors de la solidification ; Les résultats numériques montrent que la pointe conique au sommet de la goutte solidifiée est toujours disponible avec la présence d'une expansion de volume, mais l'emplacement de la pointe est déplacé vers le bas, ce qui entraîne une goutte asymétrique après la solidification complète. Le paramètre le plus influe est Bo dont l'augmentation dans la plage de 0,1 à 3,16 rend la goutte plus déformée. Le décalage de la pointe augmente également avec une augmentation de ϕ 0. Cependant, en augmentant Oh entraîne une diminution du tip shift. Concernant le temps pour terminer la solidification, une augmentation de Bo, ϕ gr ou ϕ 0, ou une diminution de St, ou ρ sl entraîne une augmentation du temps de solidification. Les effets de ces paramètres sur la hauteur de chute sont également étudiés.

Avec un modèle numérique CFD utilisé par Hanene et al [8] basé sur une technique de volume de fluide (VOF) couplée à une méthode de calcul d'interface linéaire par morceaux (PLIC), est appliquée pour simuler l'évolution temporelle de la dynamique de goutte de tensioactifs s'étalant sur des substrats liquides d'eau mince, où le tensioactif est considéré comme une phase séparée au lieu d'une solution d'eau. L'analyse cinétique des données numériques confirme l'existence de deux régimes d'étalement successifs pour toutes les gouttes de tensioactifs étudiés.

A l'égard de présenter une formulation lagrangienne pour les problèmes d'interaction thermo-couplée fluide-structure (FSI) et de montrer son applicabilité à la simulation de scénarios hypothétiques d'un accident de fusion du cœur nucléaire Franci et al [9]. Un matériau extrêmement chaud et radioactif semblable à de la lave, le corium, est généré par la fusion de l'assemblage combustible.Où, la technique numérique originale a été améliorée afin de tenir compte des effets thermiques et de modéliser les phénomènes de changement de phase. Le traitement unifié de la mécanique des fluides et du solide, associé au cadre Lagrangien du PFEM, s'est avéré être une approche appropriée pour problèmes de modélisation impliquant de grands changements de topologie et de transformation de phase.

Cependant, une simulation numérique en 3D et des expériences ont été réalisées pour analyser le processus de formation de splat dans la rainure de texture laser des gouttelettes de Molybdène de remplissage lors de la pulvérisation de plasma atmosphérique Delong et al [10]. Le diamètre des gouttelettes, la vitesse d'impact et la température ont été fixés pour remplir les rainures à texture froide. Les résultats numériques sont cohérents avec ceux de l'expérience. Les résultats Montrent que la vitesse de propagation la plus rapide de la rainure de contact des gouttelettes est de 4,63 fois celle de la vitesse d'impact initiale. La paroi de la rainure a une profondeur de fusion maximale. Au cours du processus d'étalement des gouttelettes, la couche de fluide se solidifie progressivement et l'étalement transitoire s'accompagne d'une solidification.

Par conséquent, dans ce travail on propose de simuler numériquement par la méthode VOF, l'écrasement d'une particule d'alumine partiellement fondue sur un substrat d'acier à outil H13 présentant une couche d'oxyde, en utilisons la technique d'interaction fluide structure dans l'objectif de mieux comprendre les phénomènes liés aux comportements mécaniques à l'interface particule substrat pendant la formation de lamelle.

Ce manuscrit est articulé autour de quatre chapitres.

➢ Dans le premier chapitre, est concerné à un rappel bibliographique sur la projection thermique, interaction plasma-particule, adhésion du revêtement sur substrat, préparation de surface, une vue générale sur les contraintes résiduelles, finalement le domaine d'application sur les secteurs industriels.

➢ Dans le deuxième chapitre, est dédié à la présentation du modèle mathématique traitant l'interaction plasma-particule (quantité de mouvement et transfert de chaleur).

➢Dans le troisième chapitre, est dédié à la présentation en détail la résolution numérique et la méthode de discrétisation ainsi que le modèle VOF de l'étalement de la particule sur le substrat.

➢ Dans le quatrième et le dernier chapitre du manuscrit consiste à présenter le modèle numérique, les matériaux utilisés et les principaux résultats de simulation avec ces interprétations, en se basant sur : L'étude de l'influence de l'état de fusion de la particule sur l'étalement et solidification d'une gouttelette en aluminium sur un substrat pré-oxydé et préchauffé en utilisant la méthode d'interaction fluide (FSI).

Les principaux résultats de cette étude sont synthétisés dans la conclusion générale, et des perspectives pour continuer ce travail sont évoquées.

Chapitre I

Etude Bibliographique

Introduction

I.1 Historique de la projection thermique

La projection thermique est un procédé qui permet l'élaboration de revêtement. Son principe repose sur plusieurs éléments fondamentaux :

- La fusion de la matière à projeter à travers une flamme [11].
- L'accélération de celle-ci afin d'assurer un bon étalement et par conséquent unebonne adhésion des particules au substrat

I.1.1 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 I.1).

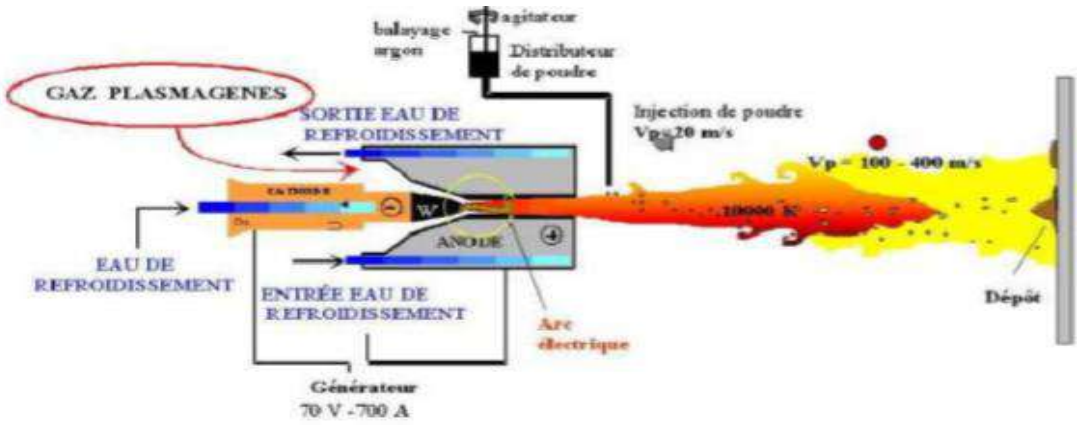


Figure I.1 Schéma de principe de la projection par plasma d'arc[12].

- **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 sensde 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.

I.1.2 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 théorie (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 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.

I.2 Interactions plasma-particules

Les études numériques et expérimentales effectuées montrent que les interactions entres les particules dans le plasma sont négligeables [13] sauf dans le cas de surcharge ou 'dense landing' [14] ce qui en projection classique, suivant la taille des particules correspond à des débits masse de poudre entre 4 et 8 kg.h-1 ; les transferts plasma/particules restent toujours les phénomènes plus importants et nous ne nous intéressons qu'à eux.

La qualité d'un dépôt dépend essentiellement de l'état de fusion et de la vitesse des particules au moment de leur impact sur le substrat. Le plasma doit donc fournir aux particules injectées les quantités de chaleur et de mouvement nécessaires à leur fusion et à leur accélération [15]. Les transferts de ces quantités, entre le plasma et les particules, contrôlent les trajectoires de ces dernières et leur état de fusion. Engelke [16] a proposé une relation simplifiée (Équation 1-1) liant l'état de la fusion des particules par le jet et les paramètres caractérisant la torche à plasma.

$$\frac{L(\bar{k}.\Delta T)^2}{V_f \mu} > \frac{(Q_l.d)^2}{16\rho} \qquad (1.1)$$

L'Équation (1-1) montre que l'état de fusion des particules est fonction de temps de séjour des particules dans le jet plasma, des températures rencontrées ainsi que de la conductivité thermique moyenne du plasma. Ces valeurs dépendent elles-mêmes de la nature des gaz plasmagènes et de l'enthalpie fournie au plasma. Récemment, d'autres auteurs ont abouti aux mêmes conclusions [17.18]. La nature et les propriétés des gaz dans la couche limite entourant chaque particule, gouvernent notamment les transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le jet plasma et les particules. La couche limite est très complexe du fait de la présence de particules élémentaires chargées et du gradient thermique entre l'enveloppe gazeuse et la surface de la particule. Cette couche peut présenter de fortes déviations par rapport à l'équilibre chimique et cinétique modifiant les transferts plasma particules.

Le transfert thermique plasma-particule est principalement dû aux mécanismes suivants [19.20]: la conduction et la convection thermique dans la couche limite, le bombardement électronique, l'absorption de rayonnement et les réactions chimiques. En l'absence de réaction chimique, c'est le chauffage par conduction-convection dans la couche limite qui joue le rôle principal et les effets de Rayonnement sont négligeables [21]. Cependant, ces mécanismes peuvent être perturbés par l'évaporation, la charge électrostatique des particules, l'effet de raréfaction et l'état de la couche limite thermique.

Les flux thermiques importants (>108 W.m-2) du jet peuvent conduire à une vaporisation des particules [22]. Ce transfert de masse modifie le transfert thermique aux particules, en absorbant, dans la couche limite, une partie du flux thermique et contribue au refroidissement du jet [23]. L'évaporation des particules se traduit également par une diminution du rendement de dépôt, et peut induire des défauts de microstructure lorsque les vapeurs se recondensent à la surface du dépôt en formation, par exemple sous la forme d'inclusions sub-microniques [24]. Le phénomène de conduction thermique interne dans les grains, pour part $\kappa > 0.03$ (le rapport des conductivités thermiques moyennes du plasma κ à celle de la particule part κ), peut se traduire par une surface atteignant la température d'évaporation et même d'ébullition alors que le centre de la particule est toujours solide.

Ce phénomène est notamment important pour les matériaux réfractaires (mauvais conducteurs de la chaleur) comme les matériaux céramiques qui nécessitent un meilleur transfert de chaleur du plasma à la particule. Ceci peut être obtenu en ajoutant de l'hydrogène ou de l'hélium au gaz plasma. Le mode de fabrication des poudres à projeter rentre aussi en compte dans l'efficacité du transfert thermique. La propagation de chaleur est plus importante pour les poudres peu denses (fabriquées par agglomération par exemple) que pour les poudres denses.

Les transferts de quantité de mouvement, les forces qui contrôlent la trajectoire des particules dans le jet de plasma sont les suivantes [25] :

➢La force de traînée visqueuse est la force la plus importante. Elle varie en fonction de l'évaporation de la particule et des effets de non-continuité dans la couche limite. Lors de la variation de l'état de la couche limite entourant la particule, le terme de Basset intervient et ne représente pas plus de 10% de la force de traînée,

➢La force de masse ajoutée est liée au volume du fluide déplacé par la particule,

➢La force de thesmophores est liée aux gradients de température dans la couche limite induisant des gradients de concentration,

- La force de gravité En général ces dernières trois forces sont négligeables devant la force de traînée. Ces forces peuvent être modifiées dans le jet de plasma par le gradient thermique important dans la couche limite, la charge électrostatique de la particule, son évaporation, la morphologie des poudres et la turbulence du jet. Cettedernière, qui se traduit par des tourbillons orientés de manière aléatoire, entraîne pour les petites particules (< 20 μm), une déviation de leur trajectoire [26].

I.3 Adhésion des revêtements sur substrat rugueux

I.3.1 Notion d'adhésion

Toutes les substances qui existent sont constituées d'un assemblage de molécules, d'atomes ou d'ions, ils sont liés entre eux par des forces de liaisons suivant le cas (de types Van der Waals, hydrogène, ioniques, covalentes, ou métalliques) [27]. Sur la surface libre demeurent des liaisons vacantes. C'est le cas par exemple des métaux où les atomes de la surface extérieure n'ont pas le nombre d'atomes voisins qu'ils auraient à l'intérieur du matériau. Du point de vue énergétique on peut associer à ces liaisons vacantes une

énergie libre de surface ɣ dont la valeur diffère suivant le matériau de 1000 à 3000 MJ/m2 pour les métaux et de 100 à 500 mJ/m2 pour les cristaux ioniques. Cette énergie est inférieure à 100 mJ/m2 pour les polymères [28].

I.3.2.1 Adhérence mécanique

La rugosité de surface des substrats est un paramètre important pour garantir l'adhérence des dépôts [29]. Les aspérités favorisent aux particules fondues de pénétrer dans le substrat et de créer ainsi une cohésion et un accrochage plus conséquent des deux matériaux. Les variations de topographie des surfaces permettent de disposer d'une aire de contact plus significative entre le dépôt et le substrat. Les aspects physicochimiques d'adhérence présentent, dans ces conditions, une probabilité plus importante de se produire. Un phénomène de contraction est observé lors du refroidissement des particules étalées sur le substrat. Et il est coûteux à la particule de posséder des atomes en surface, la forme des gouttes est donc conditionnée par ce principe. Le système tend toujours à organiser sa structure de façon à présenter une surface libre minimale. Lors de l'écrasement d'une goutte de liquide sur une surface solide, on peut distinguer deux phases :

Une première phase où la goutte s'étale afin de dissiper l'énergie cinétique accumulée avant l'impact. et une deuxième phase durant laquelle la goutte se rétracte pour minimiser son énergie au sein de son nouvel environnement (défini par la surface solide sur laquelle la goutte repose et l'atmosphère ambiante). Sous l'effet de la contraction, les particules enserrent alors les aspérités mais sont contrariées par la rugosité de surface qui produit un accrochage. Des efforts sont exercés sur l'interface sous l'effet de l'impact des particules et des fissures sont générées au niveau des défauts de contact et ces fissures se propagent le long de la ligne présentant une résistance moindre. Un relief accidenté au niveau de l'interface peut limiter la propagation de ces fissures ce qui peut éviter le décollement du dépôt. L'ancrage mécanique est donc un mécanisme important dans l'adhérence des dépôts. C'est pour cette raison que les substrats doivent généralement subir un sablage avant l'élaboration de revêtement par projection thermique. Il est aussi possible d'obtenir des adhérences significatives sans avoir recours à une modification morphologique de la surface à revêtir grâce aux processus d'adhérence physico-chimiques.

I.3.2.2 Théorie de la diffusion

La théorie de la diffusion relie linéairement le flux de diffusion au gradient de concentration. Elle fait intervenir un coefficient de diffusion qui évolue suivant la température, la pression isostatique et la mise en contrainte à l'interface. La diffusion sous contrainte par déformation plastique, pour le cas du cold spray, conduit à l'élévation de la vitesse de diffusion.

I.3.2.3 Liaisons atomiques ou moléculaires

Ce type de liaison se produit lorsque le contact entre deux surfaces est suffisamment intime (< 0,5 nm) [30]. On parle alors de liaisons physiques ou chimiques. La nature physique des liaisons implique des liaisons intermoléculaires caractérisées par une faible énergie (< 50 kJ. mol-1) [31]. Quant à la nature chimique des liaisons, il s'agit d'une liaison interatomique – à l'échelle de l'atome. Considérées comme des liaisons fortes, elles se présentent sous trois types : ionique, covalente ou métallurgique. Les deux premières ont des énergies bien plus élevées (de l'ordre de 1000 kJ. mol-1) alors que la dernière présente une énergie plus faible (entre 110 et 260 kJ.mol-1).

I.4 Préparation de surface, rugosité et adhésion

La préparation ou le traitement de surface consiste à modifier cette dernière par un simple nettoyage ou par voie chimique et/ou physique. Dans le cas de surfaces métalliques, on retrouve typiquement des couches d'oxydes rendant la surface polaire, c'est-à-dire chargée électriquement. La préparation de surface des métaux est destinée à améliorer leurs liaisons mécaniques, par exemple lorsqu'elles sont exposées à l'humidité [32]. Les raisons principales amenant à préparer la surface sont : (1) prévenir la formation d'une couche fragile superficielle, (2) créer une topographie particulière à la surface du substrat et (3) optimiser les forces d'adhésion à l'interface

I.4.1 Modification morphologique de la surface par abrasion

Si des traitements par voie chimique permettent d'accroître l'énergie de surface du substrat, un traitement mécanique par abrasion est meilleur car il fournit une surface dépourvue de sa couche d'oxyde et confère une certaine rugosité qui augmente la surface de contact du substrat. Généralement, les surfaces rugueuses abrasées forment des liaisons plus fortes que les surfaces polies en raison de leur plus grande surface de contact [32].

I.4.2 Structuration de surface par laser

Contrairement à la préparation de surface par sablage, la surface texturée par laser permet la formation de rugosités dont les dimensions et l'espacement peuvent être maîtrisées. De plus, cette technique limite la génération de contraintes résiduelles dans le matériau en restreignant ce phénomène à la périphérie des rugosités. L'ancrage mécanique, régissant pour partie l'adhésion, a été particulièrement mis en évidence et a permis de justifier son intérêt pour l'élaboration de revêtements par projection plasma [33] et cold spray [34]

I.5 Les essais d'adhérence

Il a été définie deux essais mécaniques dans le but de mesurer l'énergie d'adhérence à l'interface revêtement /substrat. Ces essais sont le test de flexion 4 points et le test de clivage au coin. L'objet de ce chapitre est de présenter ces différents essais mécaniques. La conception des échantillons développés spécialement pour ces essais et les résultats expérimentaux obtenus sont également inclus.

I.5.1 Essais mécaniques utilisés pour la mesure de l'énergie d'adhérence

Un essai mécanique a été retenu dans le but d'étudier l'énergie d'adhérence des inters faces étudiés. Le test de flexion 4 points permet de mesurer une énergie d'adhérence basée sur la propagation stable d'une fissure notamment dans le cas de collage [35]. L'objet de cette partie est de présente le principe et la mise en équation de ces différents essais.

I.6 Construction d'un dépôt projeté plasma

Un dépôt plasma est constitué par l'empilement de lamelles issues de l'étalement et de la solidification rapide des particules de poudre fondues et accélérées par le plasma.

L'étalement des particules sur le substrat et sur les lamelles précédentes est l'une des étapes les plus importantes de la projection plasma.

La technique de plasma d'arc permet de projeter une grande gamme de matériaux: métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certaines conditions, des polymères compte tenu des températures atteintes dans les jets de plasma. Cependant, une différence de 300 Cº entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour éviter qu'il ne se sublime [36]. L'utilisation du plasma sous vide partiel ou en atmosphère contrôlée, permet de matîriser certains de ces problèmes. La figure (I,2) montre l'allure générale de la structure. Le dépôt est formé par des couches successives de lamelles écrasées qui viennent s'accrocher au substrat [37,38] par différents mécanismes.

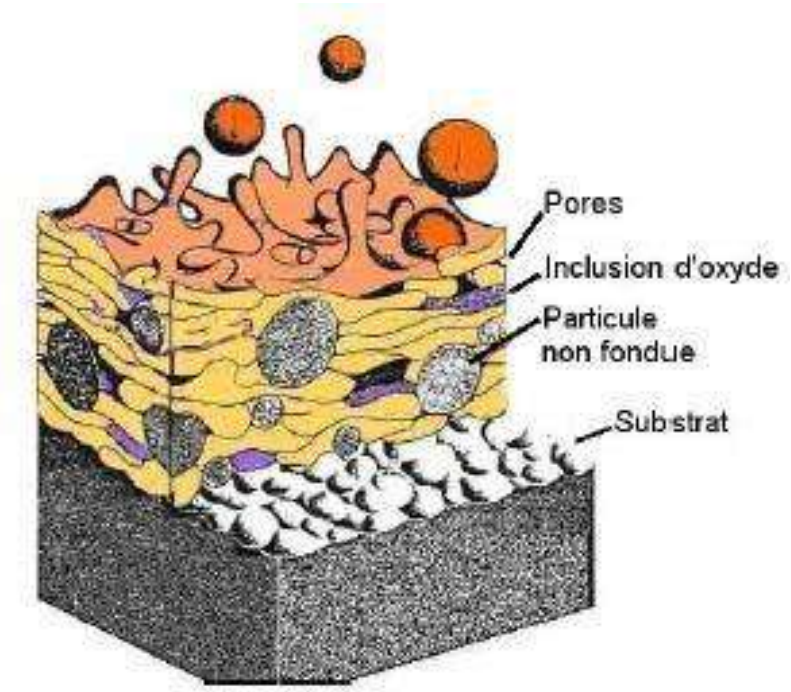


Figure I.2 Formation d'un dépôt par projection plasma [39].

I.7 Les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes qui persistent dans un matériau après qu'une sollicitation mécanique ait été exercée ou qu'un traitement thermique ait été réalisé. Ce sont les phénomènes thermiques, mécaniques et physicochimiques mis en jeu durant le trajet des particules et pendant la formation du revêtement qui conduisent à l'établissement d'un état de contraintes résiduelles microscopiques et macroscopiques [40]. Globalement, les contraintes résiduelles ont trois origines :

I.7.1 Les contraintes à l'échelle microscopique

Elles proviennent de la contraction de chacune des gouttelettes projetées au cours du refroidissement rapide jusqu'à la température ambiante. En effet lorsque
la particule fondue parvient au contact d'un matériau solide (matériau de base ou particules précédemment projetées et refroidies), elle n'a plus tous ses degrés de liberté pour se solidifier. Lors de son refroidissement, sa contraction est entravée et des tensions internes apparaissent.

I.7.2 Les contraintes d'origine métallurgique

Lors de la projection, certaines parties du matériau peuvent subir des transformations métallurgiques dont on sait qu'elles s'accompagnent généralement de variations de volume. C'est le cas de certains aciers qui, projetés thermiquement, subissent la transformation martensitique au refroidissement. Celle-ci s'accompagne d'une importante variation de volume et peut conduire à un état de contraintes de compression dans le revêtement.

I.7.3 Les contraintes thermiques

Dans le cas de recouvrement où l'élévation de la température du substrat est importante (par exemple, la projection thermique plasma), le revêtement et le substrat refroidissent simultanément. Dans une hypothèse de continuité des déformations, les contraintes résiduelles d'origine thermique sont dues à la différence des coefficients de dilatation du matériau projeté et du matériau de base (figure I.3). Si le coefficient de dilatation thermique du revêtement est supérieur à celui du substrat, le revêtement suit la contraction du substrat lors du refroidissement. Freiné dans sa propre contraction, il se trouve dans un état de contraintes de traction. L'équilibre mécanique des contraintes impose alors un état de contraintes résiduelles de compression dans le substrat. Ces contraintes sont plus élevées au voisinage de l'interface, comme le montre le schéma suivant.

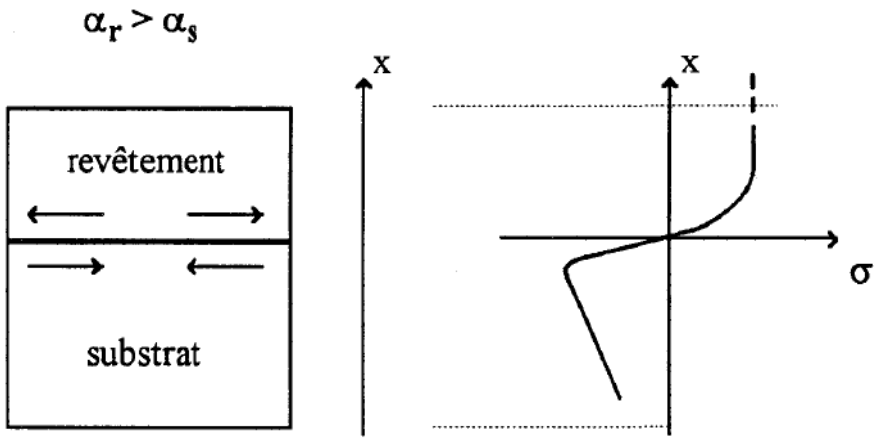


Figure I.3 Influence des coefficients de dilatation thermique sur les contraintes résiduelles.

Si le coefficient de dilatation thermique du revêtement est inférieur à celui du substrat le phénomène inverse se produit et des contraintes résiduelles sont de compression dans le revêtement et de traction dans le substrat.

Dans le cas de la projection thermique hypersonique, l'élévation de la température du substrat est peu importante du fait de la taille réduite du faisceau d'impact et de la température de la flamme relativement faible. Les contraintes résiduelles proviennent alors essentiellement du refroidissement du seul matériau projeté. Celui-ci ne pouvant se contracter librement, il s'établit un champ de contraintes de traction dans le revêtement et de compression dans le substrat, indépendamment du rapport des coefficients de dilatation thermique.

Les contraintes résiduelles résultent le plus souvent d'une combinaison de ces trois types de contraintes. Elles dépendent fortement des matériaux et des techniques de projection employées.

Contraintes Résiduelles de Traction

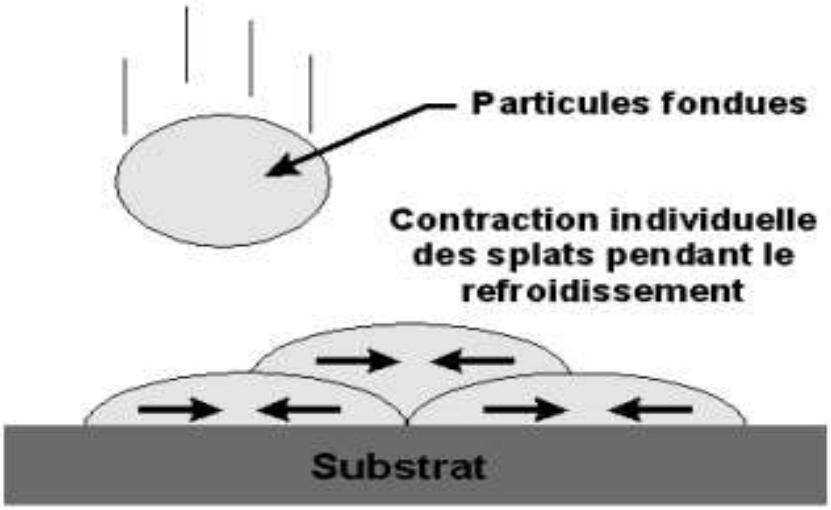


Figure I.4 Formation des Contraintes Résiduelles de Traction [41].

Contraintes Résiduelles De Compression

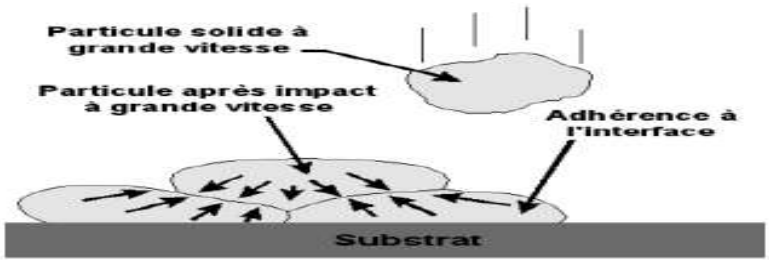


Figure I.5 Formation Des Contraintes Résiduelles De Compression [41].

Contraintes Résiduelles De Cisaillement

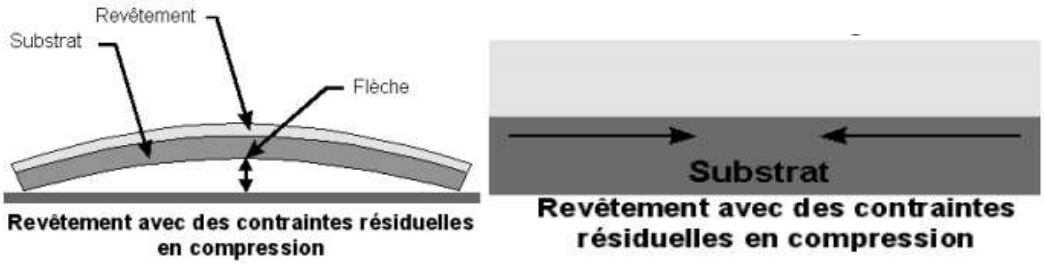


Figure I.6 : Représentation Des Contraintes Résiduelles De Cisaillement [41].

Les effets des contraintes résiduelles sur la tenue en service des pièces revêtues peuvent être, suivant le cas bénéfiques ou néfastes. Elles s'ajoutent aux contraintes appliquées et peuvent entrainer des déformations inacceptables pouvant conduire à la rupture. En milieu corrosif, la présence de contraintes superficielles de tension peut entrainer l'apparition et la propagation rapide d'une fissure jusqu'à la rupture prématurée. Un traitement thermique de relaxation peut ainsi s'avérer nécessaire si les contraintes résiduelles sont de même signe que les contraintes appliquées. Des contraintes résiduelles de compression, obtenues par sablage ou grenaillage, sont parfois volontairement créées afin d'éviter le phénomène de corrosion sous tension. Si les contraintes résiduelles sont de signe opposé à celui des contraintes appliquées, une partie de l'effort compense le champ des contraintes résiduelles. Par exemple, les contraintes résiduelles de compression jouent un rôle favorable sur la résistance mécanique des pièces soumises à des sollicitations de fatigue en stoppant ou en retardant la propagation des fissures. Il importe donc de connaitre la nature et l'ordre de grandeur des contraintes résiduelles afin de prévoir leur influence sur le comportement des pièces en service. Comme nous le verronsdans la partie expérimentale de ce mémoire, les contraintes résiduelles influencent fortement l'adhérence des revêtements projetés thermiquement.

I.8 Domain d'application

Tous les secteurs d'activité sont aujourd'hui concernés par la projection thermique. Si la protection anticorrosion reste le cas d'application le plus fréquent, certains secteur comme l'automobile présentent des applications multiples parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemple : soupapes, segment de piston, anneaux de synchroniseur, disque d'embrayage, cylindres, pompe, platines d'alternateurs, plaquettes de freins.

Les domaines d'application des dépôts projetée par plasma ne cessent de s'élargir avec la réalisation de multi-matériaux d'avenir tels que des dépôts métallique sur des pièces en

polymères.
Projection plasma a débouché sur la sonde à oxygène des pots catalytiques.

Uniquement pour cette application, 130 tonne de spinelles ont été utilisées dans le monde en 1997. La technique de cette projection possède une panoplie très étendue de matériaux d'apport, ce qui va lui permettre d'intervenir dans de nombreux cas d'application décrites dans les exemples suivants :

I.8.1 Protections contre l'usure

L'usure des surfaces des métalliques est la perte progressive du matériau à sa surface lorsqu'il est soumis au frottement. Elle est dommageable, sauf pendant le rodage et limite la durée de fonctionnement des machines .L'usure d'un mécanisme ne ressort pas uniquement du rôle joué par la lubrification, la pression et la vitesse, mais relève aussi des nombreux autres facteurs tels que la technologie de l'ensemble et de chaque pièce prise séparément, de leur métallurgie et en particulier des traitements de surface, des leurs tolérances de fabrication et des conditions d'environnement climatique telles que la température, la corrosivité, l'humidité et l'abrasivité.Le problème de l'usure est présent dans presque tous les montages mécaniques et les ressources de la projection thermique permettent souvent de trouver des solution à ce problème. Les revêtements sont choisis en tenant compte de leur nature, leur dureté et leurs qualités de surface brute de dépôt ou usinée. Le choix est fait surtout après avoir étudier la cause de l'usure.

I.8.1.1 Usure par corrosion

Elle se manifeste sous l'effet d'un jet des particules entrainées à grande vitesse par un fluide liquide ou gazeux. Dans ce cas, il est possible que des matériaux très durs ou très tendres puissent une solution. Les matériaux très durs sont les même que ceux cités aux paragraphes précédant ; quant aux matériaux très tendres, on peut signaler par exemple le plomb

I.8.1.2 Usure par fretting

C'est l'usure provoquée à l'interface de deux pièces en contact par des vibrations de faible amplitude. La notion de fatigue de surface intervient et les revêtements susceptibles de convenir doivent présenter une bonne cohésion inter granulaire. Les alliages auto-fusibles (Ni ,Cr, B, Si) ou (Co, Cr, B, Si) donnent de bons rasultas sur des montages peu sollicités. Dans le cas de sollicitations plus importantes, les carbures de tungstène avec matrice cobalt ou les carbures de chrome avec matrice nickel-chrome sont mieux adaptés.

I.8.1.3 Usure par frottement

Elle s'exerce sur deux pièces en contact et mouvement l'une par rapport à l'autre et peut se faire dans une ambiance lubrifiée ou non.

On la combat en choisissant :

- Des m'taux antagonistes ayant les plus faibles coefficients de frottement (utilisation du molybdène par exemple) ;
- Des matériaux durs (utilisation des carbures de tungstène ou des alliages autofusibles)
- Des matériaux qui allient les deux qualités déjà citées (utilisation d'oxyde de chrome

I.8.1.4 Usure par abrasion

Cette forme d'usure se produit quand le frottement se fait en présence de particule abrasive. Ce sont les matériaux dure qui combattent le mieux cette usure, tels que des céramiques ou des alliages auto-fusibles chargés de carbures métalliques. C'est le type d'usure le plus couramment rencontré. Elle est due au cisaillement par frottement des micros soudures ou jonction qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal/métal. Lorsque les deux surfaces sont en mouvement relatif, l'énergie thermique dissipée par frottement, alliée aux très fortes pressions ponctuelles, suffit pour provoquer un écoulement plastique localise du métal et souder les aspérités en contact. Les deux surfaces dénudées adhérent, soit par solubilité et diffusion : on dit qu'il y a soudure chaude, soit par adsorption solide : c'est la soudure froide.

I.8.2 Protection contre la corrosion

Le terme de corrosion désigne l'ensemble des phénomènes physico-chimique qui altère la surface des pièces métallique placées dans des ambiances agressives. Quand il s'agit de protéger des métaux, et plus particulièrement les aciers, la projection thermique joue un rôle primordial.

- La corrosion humide.
- La corrosion sèche.

I.8.2.1 Corrosions humides

Dans ce cas, le milieu humide joue le rôle d'électrolyte et des différences de potentiel peuvent s'établir entre le métal et son oxyde, entre deux zones oxygénées différemment, ou plus simplement entre les différents métaux d'un assemblage. Il y a alors formation d'une pile et consommation de l'anode .La parade à ce genre de corrosion consiste à déposer sur les surfaces métalliques à protéger des revêtements de métaux plus anodiques. Dans le cas de l'acier, le zinc et l'aluminium sont les plus utilisés ; un mélange des deux (85Zn-15Al) permet de bénéficier des avantages des deux métaux

I.8.2.2 Corrosion sèche

Elle s'apparente à une attaque chimique et le plus souvent une oxydation0 la projection à chaud apporte des solutions, soit par application de dépôts d'alliages auto- fusibles du type (Ni, Cr, B, Si) qui sont étanches par opération de refusions, soit de dépôt rendus étanches après projection par des traitements thermique, mécanique, chimique, ou par application de peintures ou de résines On peut citer, par exemple, le traitement thermique de couche d'aluminium sue acier qui, sous l'effet de la température (400°C), forment avec le fer des aluminure de fer ayant de très bonnes propriétés d'in oxydabilité Des traitements mécaniques peuvent également densifier des revêtements de métaux relativement malléables : usinage de ces dépôts par tournage, moletage ou compactage par projection sur la surface des particules sphériques métalliques ou céramiques (verre, zircone, par exemple).

I.8.3 Application aéronautiques

Dans les moteurs à turbine d'avion, de nombreuses pièces font appel à la projection thermique en générale et à la projection par torche plasma en particulier comme :

- Les surfaces des aubes de turbine
- La chambre de combustion ;
- Les joints labyrinthes ;
- Les stators rotors de compresseurs ;
- Les fixations d'aubes ;
- Les chemins de roulement de volts.

Conclusion

La réalisation d'un dépôt à partir d'une poudre montre clairement une forte interaction entre particules et substrat pendant l'étalement et la formation des lamelles, nécessite des méthodes plus puissantes. La bonne comportement thermomécanique des phénomènes thermique et dynamique couplés lors de l'étalement est le précédé par simulation numérique. Cette étude bibliographique étudie les applications de projection plasma met en évidence leurs applications et leurs axes de développement. Nos objectifs seront plus liés à la compréhension et au contrôle des mécanismes intervenant lors âgéraisaulement sur le substrat dans différentes conditions.

CHAPITRE II

Modélisation mathématique

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.

La simulation d'impact d'une goutte sur un substrat fait appel à la résolution deplusieurs équations qui couplent les aspects thermiques et dynamiques. Dans ce chapitre, nousavons décrire les équations et les méthodes numériques qui permettent de les résoudre. Descas simples dont l'expression analytique est conne serviront à valider la résolution numérique.

Actuellement, il existe deux approches pour le calcul numérique des écoulements multiphasiques : l'approche d'Eulérienne - et l'approche lagrangienne [42].

- **Approche lagrangienne**

Elle est différente par le fait que la phase particulaire ne peut occuper qu'une partie négligeable du volume. On découple alors les équations de conservation du fluide et les équations décrivant l'évolution individuelle de particules dans le fluide. Le couplage entre les deux phases se fait alors à travers des termes de sources, produits par l'échange entre la particule et un élément de volume du fluide lorsque la particule traverse celui-ci. par un algorithme itératif entre le calcul des champs d'écoulement et de température du fluide. Cette méthode donne une grande liberté sur la description des conditions d'injection des poudres dans le fluide et aussi sur la nature des poudres elles-mêmes tout en restant assez simple conceptuellement. Pour le cas du traitement de poudredans le plasma elle semble être la plus

appropriée car les changements massiques sont à généralement faibles et qu'à cause de la présence de forts gradients.

- **Approche Eulérienne**

Les bilans sur les phases sont effectués sur des repères fixes et les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergiesont écrites pour chacune des deux phases en présence. La fraction du volume occupé par chacune des deux phases est une des variables du système d'équations. On doit aussi définir des expressions qui décrivent l'échange aux interfaces en plus des conditions aux limites et initiales pour chacune des deux phases. La solution simultanée du système d'équations différentielles peut ensuite être effectuée, généralement par des méthodes numériques. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir traiter un domaine très vaste de chargements de particules. Une des applications de ce type de modèle est d'ailleurs la simulation numérique du comportement de lits fluidisés hétérogènes [42]. Ils demandent cependant un temps de calcul très grand, car les systèmes discrets résultants doivent être résolus de façon implicite.

II.1 Comportement des particules fondues à l'impact

II.1.1 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 (II.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.

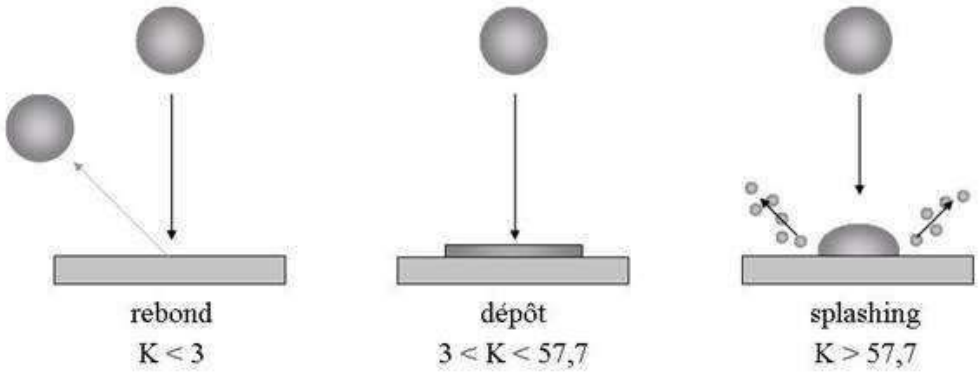


Figure II.1 Les différents modes d'impact

II.1.2 Transfert de chaleur

Plusieurs travaux [42.43.445] montrent qu'en absence de réactions chimiques à la surface, le chauffage par conduction convection dans la couche limite thermique est le mécanisme principal du chauffage de la particule dans le jet plasma. Alors que la particule, sous condition plasma, se refroidi par rayonnement vers le milieu ambiant, souvent le transfert radiatif du plasma vers la particule est négligé et le plasma est donc considéré comme optiquement mince [45].

En fonction du gaz plasmagène et de sa conductivité thermique, les particules sont soumises à des flux de chaleur très importants qui peuvent atteindre$10^8 \mathrm{w.m^{-2}}$[46], ce qui entraîne leur évaporation et modifie ainsi le transfert thermique vers elles, en effet :

• Le flux thermique reçu par une particule qui s'évapore diminue, puisqu'une partie du flux est convertie en enthalpie d'évaporation et que l'autre partie sert à chauffer les vapeurs et à les élever de la température de la surface de la particule à la température du gaz.

• L'évaporation des particules modifie le mélange gazeux et donc ses propriétés thermodynamiques et de transport dans la couche limite et dans le jet.

Le coefficient de transfert de chaleur h est classiquement calculé à l'aide de la corrélation de Ranz et Marshall [47] obtenue pour des gouttes liquides en mouvement de translation :

$$V_u = 2 + 0{,}6.\,Re_p^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

Cependant, le transfert de chaleur plasma-particule est affecté par plusieurs autres phénomènes tel que :

• le gradient de température dans la couche limite ;

• l'évaporation qui diminue le transfert de chaleur vers la particule par la formation d'un nuage de vapeur autour de la particule qui a un effet tampon ;

• L'effet Knud sen : il n'est plus négligeable dès que le diamètre des particules est inférieur à 30 µm alors que le libre parcours moyen des atomes dans le plasma est de quelques microns.

II.1.2.1 Fusion : Problème de Stefan

Quand la température de surface atteint la température de fusion du matériau, une phase liquide apparaît et sa distribution de température peut être décrite comme pour celle de la phase solide :

de l'interface solide-liquide est fonction du taux de transfert de chaleur au sein des phases solide et liquide. En retour

$$c\rho_l C_{pl} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 k_l \frac{\partial T}{\partial r}\right) \quad (2.2)$$

A l'interface solide-liquide, la température est égale à la température de fusion T = Tf,la position du front de changement de phase solide-liquide est déterminée par la résolution du problème de Stefan. Il s'agit de la formulation mathématique la plus classique [48, 49, 50], utilisée souvent comme référence pour les autres formulations [51]. Cette formulation de base suppose plusieurs hypothèses simplificatrices qui restent, pour la plupart, acceptables :
• le transfert de chaleur est principalement conductif dans les deux phases solide et liquide, et la diffusion est isotrope ;

• la température de changement de phase d'un corps est une constante qui ne dépend que du

corps lui-même ;

• l'interface entre les phases liquide et solide est fine (surfacique) ;

• la tension de surface à cette interface est négligeable ;

• les propriétés thermo-physiques du matériau sont différentes entre les deux phases, mais constantes au sein de chaque phase ;

• il n'y a pas de surfusion.

La vitesse du front de changement de phase solide-liquide est donnée par l'évolution dans le temps de sa position Rsl:

$$\partial_{sl} = \frac{\partial R_{sl}}{\partial t} \quad (2.3)$$

La vitesse du front de changement de phase est donnée par la condition de Stefan (condition de flux thermique) :

$$k_s \frac{\partial T}{\partial r}\left| - k_l \frac{\partial T}{\partial T}\right| = \rho_l L_{s1} \vartheta_{s1} (2.4)$$

En raison de cette dernière condition, le problème de Stefan est non linéaire. Le déplacement e taux dépend de la position et du déplacement del'interface. De façon pratique, il faut recourir à des méthodes de résolution numériques.L'dimensionnement des équations fait apparaître le nombre de Stefan défini commele rapport des enthalpies sensible et de changement d'état mises en jeu dans le processus defusion et donné par l'équation suivante :

$$St = \frac{C_{p(T_f - T_s}}{L_{st}} \quad (2.5)$$

II.2 Couplage avec la dynamique de la particule

L'équation de base pour le mouvement d'une particule injectée dans un système de projection thermique est une représentation de l'équilibre de la force agissant sur celle-ci. la force d'inertie est équilibré par la force de traînée visqueuse avec un nombre de forces

supplémentaires telles que, les force de gradient de pression, la force de Basset, la force de gravité , la force thermique due à la thesmophores, ect…,

L'équation régissant le transfert de quantité de mouvement entre une particule sphérique de diamètre dpet le mélange gazeux, et avec l'effet de la présence du substrat peut être s'exprimé sous la forme suivant [41,52]

$$\rho_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_{th} \qquad (2.6)$$

Avec Fthla force thermique donné comme suiv

$$\vec{F}_{th} = \frac{12\pi.\mu_\infty.v_\infty.\frac{d_p}{2}.\frac{C_s}{T_\infty}\overrightarrow{grad}T}{\left(1+6C_m.{}^{\lambda}/_{d_p}\right)(1+2k_\infty/k_{p+4C_1.\lambda/d_p})}$$

$$F_D = -\frac{1}{2}C_D.\pi\frac{d^2_p}{4}.\rho_{\infty.}|V_\infty - V_p|.(V_\infty - V_p) \qquad (2.7)$$

En remplaçant FD par son expression :

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3}{4}\frac{C_p}{d_p}\frac{\overrightarrow{\rho_g}}{\rho_p}(V_\infty - V_p)\left|V_g - V_p\right| + \frac{F_{th}}{\rho_p} \qquad (2.8)$$

La condition initiale de la quantité de mouvement est :

à t=0. ; vp=vP0

vP0 est la vitesse axiale initiale avec laquelle la particule est injecté dans le gaz.

$\rho_g$est la masse volumique moyenne est définie par [53]

$$\overline{\rho_g} = \frac{1}{T_g - T_{PS}}\int_{T_{PS}}^{T_g}\rho_g dt \qquad (2.9)$$

Tg et TPS sont des températures du gaz et la température du particule da la couche limite respectivement. Le coefficient de traînée CD est calculé et présenté par l'équation suivant.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + Re_p < 0{,}2 \qquad (2.10)$$

Ou Rep est le nombre de Reynolds défini par rapport au diamètre de la particule et la vitesse relative fluide-particule. Pour des nombres de Reynolds plus élevée, on doit utiliser solution D'oseen [54]et les corrélations empiriques suivantes Boulos et Gauvin [55].

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.187Re_p\right) \qquad 0{,}2 < Re_p < 0{,}2 \qquad (2.11)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.11Re_p^{0.81}\right) \qquad 2 < Re_p < 21$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.189Re_p^{0.632}\right) \qquad 20 < Re_p < 500$$

LEE [56] propose l'utilisation de la relation suivant :

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{(1 + \sqrt{Re_p})} + 0{,}4 \qquad (2.12)$$

En tenant compte de l'effet de discontinuité de Knudsen , le coefficient de traînée devient [57,53]

$$C_D = C_{D.C}\Phi^{0.45}$$

CD.C est le coefficient de traînée calculé par les formules (2.10),(2.11). Φle coefficient de correction est calculé [57,41].

$$\Phi = \frac{T_g - T_{Pv}}{T_g - T_{Ps}} = \left[1 + 4\left(\frac{2-\theta}{\theta}\right)\left(\frac{\Gamma_{ps}}{1+\Gamma_{ps}}\right)\left[\frac{Kn^*}{Pr_{ps}}\right]\right] \text{(2.13)}$$

Γest le rapport des chaleurs spécifiques du gaz et de la particule. PrPSle nombre de Prandtl correspond à la température de la surface.

Kn* le nombre de Knudsen modifiée

$$Kn^* = \frac{2Pr_{PS}}{\rho_{PS} v_{PS} d_P} \frac{\overline{K_{g,t}}}{C_{g,t}}.$$

vla vitesse moléculaire ;

$$v = \left(\frac{8.RT}{\pi.M}\right)^{\frac{1}{2}}$$

K g,tetC g.t sont les moyennes intégrales entre les températures TPS et TPV.

II.3 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 (II.2). La solidification de la lamelle commence généralement avant que son étalement soit complètement terminé.

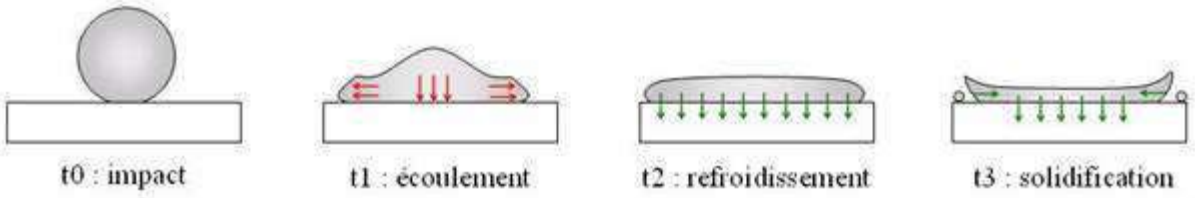
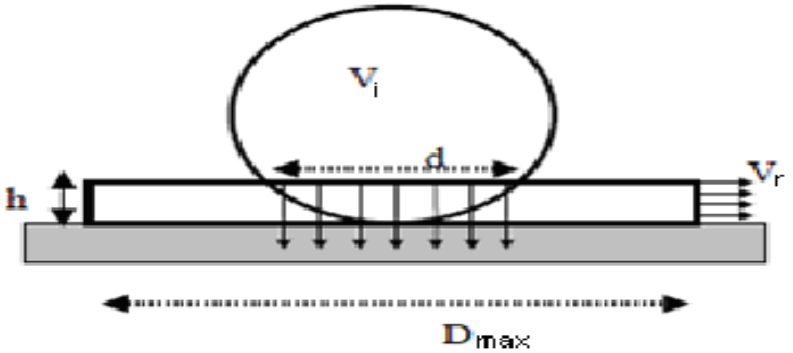


Figure II.2 : Mécanisme d'étalement des lamelles

II.3.1 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 II.3)



FigureII.3 : Schéma d'étalement d'une goutte [58]

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

$$E_{c1} = \left(\frac{\pi}{6} D_i^3\right)\left(\frac{1}{2}\rho v_i^2\right) \quad (2.14)$$

Lorsque la goutte atteint son maximum d'étalement, son énergie cinétique est nulle (Ec2 = 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 :

$$E_{s2} = \sigma_{LS}\pi\frac{D_{max}^2}{4} + \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4} - \sigma_{SG}\pi\frac{D_{max}^2}{4} \quad (2.15)$$

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:

$$\cos(\theta_a) = \frac{(\sigma_{SG} - \sigma_{LS})}{\sigma} \quad (2.16)$$

En combinant les deux expressions précédentes:

$$E_{S2} = \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4} - \sigma\pi\frac{D_{max}^2}{4}\cos(\theta_a) \quad (2.17)$$

Finalement

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

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

$$W = \int_0^{tc}\int_\Omega^t \emptyset \, d\Omega dt \approx \emptyset\Omega t_c \quad (2.18)$$

Ou Ω est le volume de fluide visqueux, tC le temps nécessaire à l'étalement de la goutte e ϕ la fonction de dissipation visqueuse. L'ordre de grandeur de cette dernière est estimé par :

$$\emptyset \approx \mu\left(\frac{V_i}{L}\right)^2 \quad (2.19)$$

Où μ est la viscosité de la goutte et L une longueur caractéristique normale à la direction de l'étalement. [59] S. CHANDRA et C.T. AVEDISIAN ont supposé que cette longueur de référence peut se rapporter à l'épaisseur de splath. leur résultats surestiment le degré d'étalement maximal Dmaxde plus de 40٪ ce qui tend à montrer que Ldoit être inférieure à h. [60] H.JONES proposent de donner à L la valeur de l'épaisseur de couche limite δ à l'interface liquide solide. Celle-ci est calculée en considérant l'écoulement comme stationnaire. Elle s'exprime alors par :

$$\delta = 2\frac{D_i}{\sqrt{Re}} \qquad (2.20)$$

Le temps d'étalement tC, quant 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 2.2), la conservation des débits permet d'affirmer que :

$$V_i\pi\frac{d^2}{4}=V_rDh \qquad (2.21)$$

A l'instant de l'étalement maximal, le diamètre du splat atteint Dmax. Par conservation de la masse :

Soit

$$h = \frac{2D_i^3}{3D_{max}^2} \qquad (2.22)$$

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

$$V_r = \frac{dR}{dt} = \frac{1}{2}\frac{dD}{dt} \qquad (2.23)$$

Et donc

$$\frac{dD}{dt} = 2V_r = 2V_r\pi\frac{D_i^2}{16}\frac{1}{D}\frac{3D_{max}^2}{2D_i^3} \qquad (2.24)$$

Soit

$$\frac{dD}{dt} = V_r\pi\frac{3}{16}\frac{D_{max}^2}{D_i}\frac{1}{D} \qquad (2.25)$$

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

$$D(t) = \sqrt{\frac{3\pi}{8}\frac{V_i}{D_i}}\, D_{max}^2 t \qquad (2.26)$$

En faisant apparaître le temps adimensionné par rapport à la vitesse d'impact :

$$t^* = \frac{V_i}{D_i} t\text{On}$$

Onobtient finalement :

$$\frac{D(t)}{D_{max}} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}}\, t^* \quad (2.27)$$

Lorsque le diamètre atteint Dmax, le temps correspondant est de tc=8Di/3Vi. A présent que L = δ, tcet Ω = πD²max δ/4 sont déterminés, on peut évaluer W :

$$W=\frac{\pi}{3}\rho D_i V_i^2 D_{max}^2 \frac{1}{\sqrt{Re}} \qquad (2.28)$$

Finalement, par conservation des énergies:EC1+ ES1= EC 2 + ES 2 +Wce qui, en combinant avec leurs expression respectives amène à:

$$\frac{D_{max}}{D_i} = \sqrt{\frac{We+12}{3(1-\cos\theta_a)+4\left(\frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}} \qquad (2.29)$$

Le terme (1- cosθa)qui correspond à l'influence de l'angle de contact est compris entre 0 et 2. Ainsi, si>2We Re>, ce qui se traduit parWe>>Re,les effets capillaires peuvent être négligés. Si de plusWe>>12 , la formule précédente peut se ramener à :

$$\xi_{max} = \frac{D_{max}}{D_i} = \frac{1}{2} Re^{\frac{1}{4}} \qquad (2.30)$$

Sur le même style de raisonnement, [61] se basent sur l'équation de Kurabayashi (2.35) modifiée par yang (2.29) pour déterminer l'influence de l'angle de contact pour des impacts

des gouttes à nombres de Weber supérieurs à 150. Dans ces équations μ substrat correspond à la viscosité de la goutte évaluée près du substrat et n<1

$$\frac{We}{2} = \frac{3}{2}\xi_{max,K}^2\left[1 + \frac{2We}{Re}\left(\xi_{maw,k}^2 In\ \xi_{max,K} - \frac{\xi_{maw,k}^2 - 1}{2}\right)\left(\frac{\mu_{goutte}}{\mu_{substrat}}^{0.14}\right)\right] - 6 \qquad (2.31)$$

$$\xi_{modifie} = \xi_{max.k}\left(\frac{45}{\theta}\right)^n$$

Ces équations montrent que pourθ<45 , l'effet de l'angle de contact sur l'écoulement est négligeable

II.3.2 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 [62].

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 [63].

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 [64]. 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 [65].

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.

$$B_t = \frac{k - e_p}{k_s}$$

Avec h, coefficient d'échange thermique à l'interface, epl'épaisseur de la lamelle, Ks la conductivité thermique du substrat. Le nombre de Biot permet, selon sa valeur, de classer le refroidissement de la lamelle en trois catégories [63] :

• Bi >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.

• Bi <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< Bi <30, le refroidissement est qualifié d'intermédiaire. L'efficacité du transfert thermique est fonction de la résistance thermique de contact Rth, définie comme l'inverse du coefficient d'échange inter facial 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 (Rth) et la température du splat.

II.4 Interaction particule-structure

II.4.1 Contrainte et déformation effectives

En général les pièces mécaniques sont soumises au chargement multiaxial, il en résulte des déformations et des contraintes multiaxiales. Pour utiliser les données issues des expériences unidimensionnelles à des conceptions fines, il est nécessaire de remplacer les contraintes et les déformations multiaxiales par des magnitudes unidimensionnelles efficaces. Nous représentons les contraintes et les déformations effectives respectivement par σeetεe. Il existe plusieurs méthodes connues pour dériver les contraintes et les déformations Effectives. Celles présentées ici sont basées sur la théorie de Von Mises et ont été choisies pour leur applicabilité à la conception

A) la déformation effective

La déformation effective a les trois composantes principales suivantes, qui suivent l aloide Hooke :

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}\sigma_e = \varepsilon_e$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}v\sigma_e = -v\varepsilon_e \quad (2.32)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}v\sigma_e = -v\varepsilon_e$$

Module de Young

Par conséquent, le tenseur de déformation effective est égal à :

$$T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_e & 0 & 0 \\ 0 & -\upsilon\varepsilon_e & 0 \\ 0 & 0 & -\upsilon\varepsilon_e \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Répétant le procédé utilisé pour la contrainte effective, nous assortissons les déviateurs de la déformation effective et multiaxiale :

$$\begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_e-\varepsilon_e-\upsilon\varepsilon_e}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\upsilon\varepsilon_e-\frac{\varepsilon_e-2\upsilon\varepsilon_e}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\upsilon\varepsilon_e-\varepsilon_e-2\upsilon\varepsilon_e}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\varepsilon_1-\varepsilon_2-\varepsilon_3}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\varepsilon_2-\varepsilon_3-\varepsilon_1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\varepsilon_3-\varepsilon_1-\varepsilon_2}{3} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Assimilant les deuxièmes invariants des déviateurs respectifs, nous obtenons l'expression de la déformation effective

$$\varepsilon_e = \frac{1}{(1+v)\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \qquad (2.35)$$

En termes de déformations dévia toriques, la déformation effective est égale à :

$$\varepsilon_e = \frac{1}{(1+v)}\sqrt{\frac{3}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2} \qquad (2.36)$$

Sur la base de la loi de Hooke, nous pouvons dériver une corrélation entre la contrainte et la déformation effectives de la manière suivante. Tout d'abord, en appliquant l'équation (2.43) pour les contraintes et les déformations dévia toriques :

Puis en combinant les équations (3.34), (3.35) et ,on obtient :

$$e_i = \frac{1+v}{E} S_i \quad i = 1,2,3 \qquad (2.37)$$

$$\sigma_i = \frac{1+v}{E} S_i \qquad (2.38)$$

B) contrainte effective de Von-Mises

Le tenseur de la contrainte effective σ est écrit :

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (2.39)$$

Après von Mises, nous faisons correspondre les déviations des contraintes effectives et multiaxiales, sans tenir compte pression hydrostatique

$$D_\varepsilon = \begin{bmatrix} \sigma_e - \frac{\sigma_e}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_e}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sigma_e}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_2}{3} \end{bmatrix}$$

(2.40)

En assimilant les deuxièmes invariants des déviateurs respectifs, nous obtenons l'expression suivante:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \qquad (2.41)$$

Dans une autre forme, en termes de composants dévia toriques, la contrainte effective est égale à :

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S_1^2} + \mathbf{S_2^2} + \mathbf{S_3^2}} \qquad (2.42)$$

II.4.2 Le travail

La charge agissant sur un corps effectue un travail, qui est transformé et stocké dans le corps sous forme d'énergie de la déformation élastique. $\overline{W}$ *i*est le travail spécifique par volume unitaire, qui égale l'énergie de déformation élastique stockée

$$\overline{W_t = \frac{1}{2}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3) = \overline{U_t}} \qquad (2.43)$$

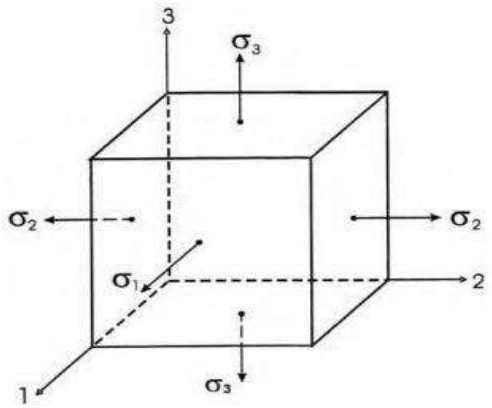


Figure II.4 Les composants de Contrainte Agissant Sur un Cube Elémentaire en Directions Principales

Nous considérons que le travail total est la somme de deux parties: le travail de la dilatation (volumétrique) et le travail de déformation :

$$\overline{W_t} = \overline{W_t^v} + \overline{W_t^d} \quad (2.44)$$

Le premier terme lié au volume, et le deuxième correspond à la forme. Le travail de dilatation est le travail effectué par les contraintes moyennes dans les trois directions principales (Figure 2.5) :

$$\overline{W_t^v} = \frac{3}{2}\sigma_m\varepsilon_m = \frac{1}{6}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (2.45)$$

Tandis que le travail de déformation est effectué par les efforts deviatoriques . Après la dérivation de l'expression finale du travail de déformation, on l'écrit comme suit :

$$\overline{W_t^d} = \frac{1}{2}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3) - \frac{1}{6}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (2.46)$$

Ce qui devient après l'application de la loi de Hooke :

$$\overline{W_t^d} = \frac{1+v}{6E}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.47)$$

Maintenant, en utilisant les équations (2.47), l'équation ci-dessus peut être réduite à :

$$\overline{W_t^d} = \frac{1}{2}\sigma_e\sigma_e \quad (2.48)$$

Le travail de déformation est utilisé pour mesurer le début de la déformation plastique

II.4.3 Les équations d'équilibre

Pour dériver les équations d'équilibre, considérons un corps solide en équilibre statique soumis à des forces appliquées et a des contraintes géométriques. Les forces appliquées comprennent des forces volumiques spécifiques (X, Y, Z). Les contraintes géométriques signifient que certains points du corps ont prescrit des déplacements. Considérons un cube infinitésimal au sein de ce corps, voir la (figure II.4). En raison de l'état d'équilibre, le somme des forces et des moments agissant sur le cube doit être égal à zéro. Rapportons d'abord aux composantes x de contraintes et de forces. Pour résumer les résultats, après la multiplication des contraintes par les zones respectives et de la force par le volume du cube, on obtient l'équation suivante :

$$\left[\left(\sigma_x + \frac{\partial\sigma_x}{\partial x}dx\right) - \sigma_x\right]dydz + \left[\left(\tau_{xy} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}dy\right) - \tau_{xy}\right]dzdx + \left[\left(\tau_{xz} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z}dz\right) - \tau_{zx}\right]dxdy + Xdxdydz = 0$$

(2.49)

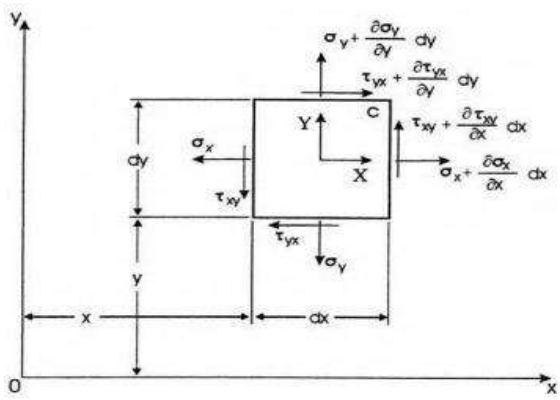


Figure II.5 Les Composantes des Contraintes Agissant Sur un Cube Elémentaire:
(Projection Sur Le Plan X.Y)

Effectuant la même opération avec les composantes sur les axes (y) et (z), nous obtenons les trois équations suivantes :

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zxz}}{\partial z} + X = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0 \qquad (2.50)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + Z = 0$$

Conclusion

Dans de ce chapitre, on a détaillé le modèle développé de l'écoulement du jet de plasma et on a étudié les transferts plasma-particule et les changements de phase susceptibles d'avoir lieu dans une particule dans les conditions plasma. La conduction de la chaleur et la distribution de la température dans la sphère sont décrites par l'équation de continuité du flux d'énergie thermique, adaptée à la géométrie sphérique. Les mouvements des fronts de changement de phase (fusion, et solidification) et les équations d'interactionparticule-substrat Enfin, on a présenté le modèle numérique du problème.

CHAPITRE III

Résolutions Numériques

Introduction

La simulation numérique d'impact d'une goutte sur un substrat fait appel à la résolution de plusieurs équations qui couplent les aspects thermiques et dynamique. Ce chapitre est dédié à la présentation de la méthode numérique utilisée qui permet de les résoudre.

III .1 Résolutions Numériques

Pour passer d'un problème exact continu régit par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles des méthodes.

➢ La méthode des différences finies (MDF) procédé par approximation des dérivées d'une fonction en termes de ces valeurs approchées aux nœuds du maillage.

➢ La méthode des volumes finis.

➢ La méthode des éléments finis.

III .1.1 La méthode des volumes finis

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 v0, la densité massique ρ du liquide, sa viscosité μ, la température initiale de la goutte et du substrat.

III .1.2 La méthode des éléments finis(MEF)

a méthode des éléments-finis (MEF) est une méthode d'approximation numérique des solutions de problèmes aux limites statiques ou dynamiques tels que, la diffusion thermique, la mécanique des milieux continus (solides et fluides), et l'électromagnétisme. L'appellation éléments finis vient de la décomposition du domaine d'étude en éléments : ils sont représentés par un maillage [66].

La méthode d'analyse par éléments finis exige les étapes principales suivantes :

➢ Discrétisation du domaine dans un nombre fini de sous-domaines (éléments).

➢ Choix des fonctions d'interpolation.

➢ Développement de la matrice d'élément pour le sous-domaine (élément).

➢ Assemblage des matrices d'élément

➢ Imposition des conditions de frontière.

➢ Solution des équations.

➢ Après traitement (Affichage des résultats,)

Il y a trois approches principales pour construire une solution approximative basée sur le concept de la MEF [66]

➢**Résidus pondérées :** C'est une méthode souple et polyvalente, Cette approche utilise directement les équations différentielles relatives, telles que celles du transfert de chaleur et de la mécanique des fluides

➢**Approche directe:** Cette approche est employée pour des problèmes relativement simples

➢**Approche variationnelle :** Cette approche est basée sur le calcul des variations, qui est caractérisée par un fonctionnel. Ce fonctionnel correspond à l'énergie potentielle dans la mécanique de la structure. Dans cette méthode, la transformation du problème d'ingénierie pratique à une représentation mathématique est réalisée en discrétisant le domaine à étudier par des éléments (sous domaines). Ces éléments sont reliés entre eux par leurs nœuds « communs ». Selon lagéométrie et la nature physique du problème, le domaine à étudier peut-être discré tiserenutilisant des éléments linéaires, surfaciques, ou volumiques. Des éléments de base utilisés dans la MEF sont montrés sur la (figure 3.1) [66].

Chaque élément, identifié par un numéro d'élément est défini par une séquence spécifique de numéros de nœuds globaux. La séquence spécifique (généralement dans le sens contraire de la rotation des aiguilles d'une montre) est basée sur le nœud de numérotation au niveau de l'élément .

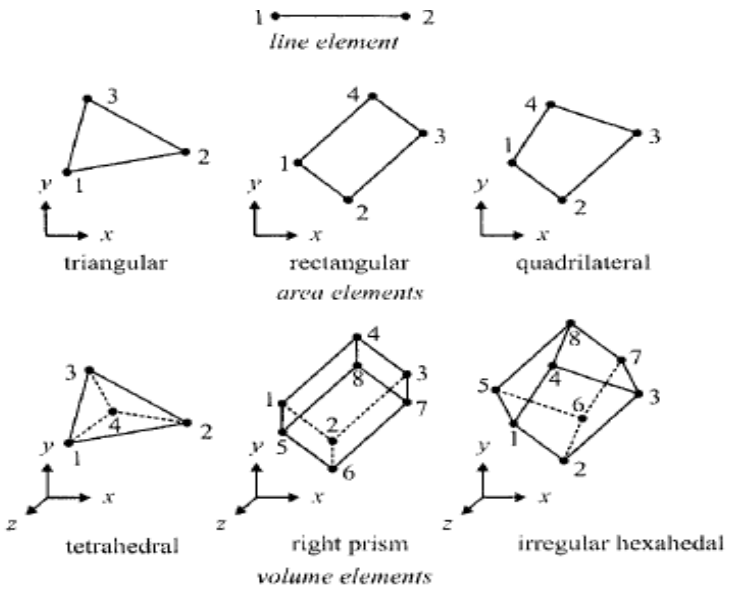


Figure III.1 Description Des Eléments Avec Le Nombre Des Nœuds (Linéaires, Surfaciques, Et Volumiques) [66]

III .1.3 Approche lagrangienne

Dans le substrat, la contrainte est liée aux déformations par:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}(3.1)$$

Ou alors

$\{\sigma\}$: vecteur de contrainte=$\left[\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}\right]^T$

$[D]$ Élasticité ou matrice de rigidité élastique. Pour certains éléments anisotropes, définis par une définition de matrice complète

$\{\varepsilon_{el}\}: \{\varepsilon\} - \{\varepsilon_{th}\}$:Vecteur de déformation élastique

$\{\varepsilon\}$: Vecteur de déformation totale=$\left[\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}\right]^T$

$\{\varepsilon_{th}\}$: vecteur de déformation thermique.

Eq. (3.1) peut également s'écrire:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (3.2)$$

Pour le cas 3D, le vecteur de déformation thermique est

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T\left[\alpha_x^{se} \alpha_y^{se} \alpha_z^{se} 0\ 0\ 0\right]^T \quad (3.3)$$

α_x^{se}: Coefficient de dilatation thermique dans la direction x

La matrice de flexibilité, $[D]^{-1}$s'écrit:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -v_{xy}/E_x & -v_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -v_{yx}/E_y & 1/E_y & -v_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -v_{zx}/E_z & -v_{zy}/E_z & 1/E_Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{XY} & 0 & 1/G_{XY} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{XY} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{XZ} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Où les termes typiques sont:

Ex: Module de Young dans la direction x.

vxy: coefficient de Poisson majeur.

vyx:petit coefficient de Poisson.

Gxy: module de cisaillement dans le plan xy.

Pour le cas 2D en plus, la matrice [D]-1 est présumée symétrique, de sorte que

$$\frac{V_{yx}}{E_y} = \frac{V_{xy}}{E_x}$$

Le développement d'Équationsdonnent explicitement les trois équations:

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{V_{xy}\sigma_y}{E_x} \qquad (3.5)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{V_{xy}\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} \qquad (3.6)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \qquad (3.7)$$

Où les termes typiques sont:

εx: Déformation directe dans la direction x,

σx: Contrainte directe dans la direction x,

εxy: Déformation de cisaillement dans le plan xy,

σxy: Contrainte de cisaillement sur le plan xy.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x = \frac{E_x}{h}(\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h}(V_{xy})(\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) \\ \sigma_{y=} \frac{E_y}{h}(\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_y}{h}(V_{xy})(\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) \\ \sigma_{xy} = G_{xy}\varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \qquad (3.8)$$

Ou alors:

$$h=1-(V_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} \qquad (3.9)$$

Le module de cisaillement (Gxy) est calculé comme suit:

$$G_{xy} = \frac{E_x}{2(1+V_{xy})} \qquad (3.10)$$

III .1.4 Approche eulérienne

Les équations de Navier-Stokes pour les écoulements de fluides incompressibles et la viscosité constante

$$\rho\alpha\frac{\partial\mu_i}{\partial t}+\rho\alpha\mu_i\frac{\partial\mu_i}{\partial x_j}=\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}+b_i \quad (3.11)$$

α : variable de couleur

Dans l'équation ci-dessus, i, j = 1,2 sont les coordonnées spatiales, t est la variable de temps, ρ est la densité du fluide, ui sont les composantes de la vitesse du fluide, bi sont les forces de organisme externe, et τij est le tenseur des contraintes est soumise à la restriction d'incompressibilité

$$\frac{\partial_{\propto.\mu_i}}{\partial_{x_i}}=0 \quad (3.12)$$

et le tenseur des contraintes est donné par:

$$\tau_{ij}=\alpha.p.\delta_{ij}+\mu.\alpha\left(\frac{\partial\mu_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\mu_j}{\partial x_i}\right) \quad (3.13)$$

où μ est la viscosité dynamique, p est la pression, δij est le coefficient de Kronecker et α est la variable de couleur. Pour indiquer l'absence ou la présence du fluide, une fraction volumique de fluide est définie pour chaque domaine. La valeur 1 est fixée dans le domaine occupé par le métal et 0 pour le domaine restant. La valeur moyenne dans l'élément présente la fonction du volume de fluide occupé par le métal, Liu et al. [67]:

$$\alpha=\begin{cases}1\text{a L itèreurde du fluide}\\0<\alpha<1 \qquad a\ liter face\\0\text{ cellule vide}\end{cases} \quad (3.14)$$

0L'élément dont la valeur α est comprise entre 0 et 1 contient la surface libre ou l'interface. Pour trouver (x, t) pour tous les points du domaine, il faut résoudre l'équation de transport:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + v\nabla\alpha = \frac{d\alpha}{dt} \text{ avec } \quad \alpha(x,0) = \alpha_0(x) \qquad (3.15)$$

Les équations sont écrites pour un domaine fixe Ωf et pour un intervalle de temps Δt.

III .2 Interaction entre particule-structure

Interaction entre particule-structure L'interaction entre le fluide et la structure à une interface de maillage produit une pression. De plus, le mouvement des structures génère une "charge fluide". Les équations sous forme matricielle qui régissent deviennent:

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [K_s]\{U\} = \{F_s\} + [R]\{P\} (3.16)$$

$$[M_f]\{\ddot{P}\} + [K_f]\{P\} = \{F_f\} - \rho_0[R]^T\{\ddot{U}\} \qquad (3.17)$$

$[R]$ est une matrice de couplage qui présente la surface effective associée à chaque nœud sur l'interface fluide-structure (FSI).Cette matrice prend en considération la direction vectorielle normale qui est définie pour chaque paire de faces fluides, et l'élément structurel coïncident qui comprend la surface d'interface. Les quantités de structure et de charge fluide générées à l'interface fluide-structure sont des fonctions de degrés de liberté nodaux inconnus.

III .2 .1 Méthodes de Couplage

Que les méthodes de couplage unidirectionnel ou bidirectionnel soient utilisées, les solutions sont basées sur une méthode partitionnée où des solutions séparées pour les différents champs physiques sont préparé. Un domaine qui doit être résolu est la dynamique des fluides, l'autre est la dynamique des structures. A la frontière entre les fluides et les solides, l'interface fluide-structure, information pour La solution est partagée entre le solveur fluide et le solveur structure. Les informations échangées dépendent de la méthode de couplage. Pour les calculs de couplage unidirectionnel, seul le fluide de la pression agissant sur la structure est transféré au solveur de structure. Pour couplage bidirectionnel calculs, le déplacement de la structure est également transféré au solveur fluide.

Dans la (figure 2.7), en haut, la procédure de résolution est illustrée pour le couplage unidirectionnel. Initialement, le champ fluide est résolu jusqu'à ce que les critères de convergence soient atteints. Les forces calculées à les limites de la structure sont ensuite transférées du côté de la structure. Ensuite, le côté structure est calculé jusqu'à ce que le critère de convergence soit atteint. Ensuite, le débit de fluide pour la prochaine fois le pas est

calculé jusqu'à la convergence. La solution est terminée lorsque le nombre maximum de pas de temps est atteint.

L'organigramme du processus pour l'algorithme de couplage bidirectionnel fort est affiché sur le bas de la figure 1. Dans un pas de temps au cours de la simulation transitoire, une convergence de la solution pour le champ d'écoulement est nécessaire pour fournir les forces agissant sur le corps. Après en interpolant les forces du maillage fluide au maillage de surface de la structure, une convergence la solution de la dynamique structurelle sera atteinte sous l'effet des forces agissantes. La réponse de la structure à la charge émergente représente un déplacement de la grille structurelle nœuds. Les déplacements à la frontière entre structure et fluide sont interpolés au maillage fluide qui conduit à sa déformation. Cette étape ferme une boucle interne de la simulation. Pour les simulations de couplage bidirectionnel fort, ces étapes sont répétées jusqu'à ce que les changements des forces d'écoulement et les déplacements structurels tombent en dessous d'une quantité prescrite. Ensuite, un nouveau pas de temps est lancé. Pour les simulations de couplage faible dans les deux sens, la convergence aux frontières entre structure et fluide n'est pas considérée et un nouveau pas de temps est lancé directement

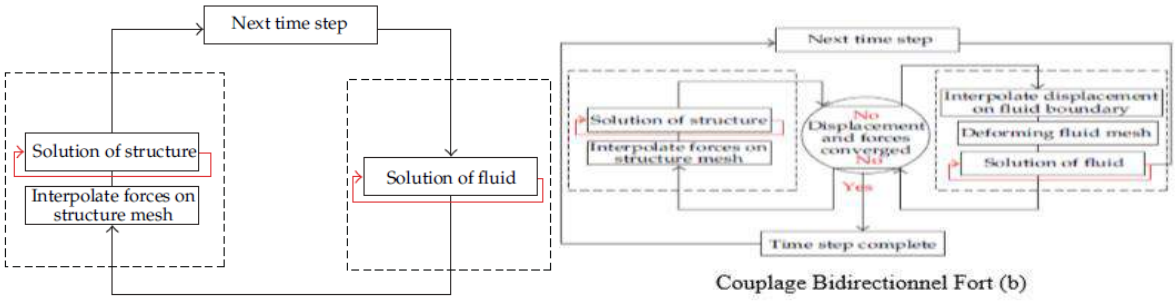


Figure III .2 Algorithme de solution pour le couplage unidirectionnelet bidirectionnel fort [68]

Quelques commentaires généraux peuvent être faits sur les deux méthodes. Souvent l'avantage d'une méthode est un inconvénient de l'autre. En général, la solution de couplage bidirectionnel est plus précise, en particulier pour les déflexions plus importantes où le champ de fluide est fortement influencé par la structure déformation. Les solutions de couplage bidirectionnel puissant peuvent être d'une précision temporelle de second ordre et sont plus stables voir Vaassen et al. [19] .La méthode de couplage unidirectionnel ne garantit pas conservation de l'énergie à l'interface, mais dans les deux sens. Un avantage du couplage unidirectionnel la simulation est un temps de calcul significativement plus faible. Un

deuxième avantage est que la déformation du maillage fluide n'a pas besoin d'être calculé, ce qui fournit un maillage de qualité constante.

Conclusion

Dans de ce chapitre, nous avons détaillé la méthode des éléments finis et la méthode de volume of fluide. Enfin, nous avons présenté le modèle numérique du problème.

Chapitre IV

Résultat et discussion

Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats d'étude de la simulation numériques d'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier comparer avec celle de M. Xue etal[69]d'autre part, la simulation numérique d'impact de goutte d'aluminium partiellement fondue sur un substrat d'acier oxydé (couche d'oxyde d'acier (Fe_2O_3), passant par une variation de pourcentage de l'état de fusion dans la goutte. Les résultats faits à partir d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel « ANSYS ».

IV.1 ANSYS

Le code de calcul ANSYS est un programme Elément Finis permettant des structures tridimensionnelles dans les domaines suivants : thermiques, mécanique, statiques et dynamique linéaires et nom-linéaires, interaction fluide-structure, analyse à la fatigue…

Le code propose une libraire d'étalement pour modéliser correctement les structures et les différents effets recherchés (poutres, coques, solide, fluide, matrices de raideur, de masse, d'amortissement, etc.).

IV.1.1 Les points forts des outils ANSYS

- Une interface WORKBENCH intuitive et très facile à prendre en main.
- L'associativité avec tous les outils CAO 3D disponibles sur le marché.
- La possibilité de communiquer avec tous les logiciels CAO du marché : en format natif avec Catia V4 et V5, Solid Edge, NX-Unigraphics, Pro/Engineer, SolidWorks, Autodesk Inventor et Mechanical Desktop, et par l'intermédiaire de passerelles Acis et Parasolid intégrées avec tous les autres produits.
- Des notes de calcules automatiques.
- Des meilleurs robustes.
- Des outils de convergence automatique.
- Une gestion automatique des assemblages et des contacts.
- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités.

IV.1.2 Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux

- ANSYS Design Space est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces les constituants.
- ANSYS Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires : mécaniques et thermiques. Il comprend des outils

de contrôle avancés tels que les options de contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, les combinaisons de solution, le post traitement de zones de contacts.

- ANSYS Structural et Mechanical0 permettent d'accéder à tous les types de non linéaire : matériaux, grandes déformations et grands déplacements. Ils sont dédiés à des utilisateurs confirmés qui disposent de connaissances théoriques sur les éléments finis

IV.1.3 Schéma de logiciel ANSYS

- Le logiciel ANSYS calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristique ou blocs fonctionnels décrits sur la figure IV.1

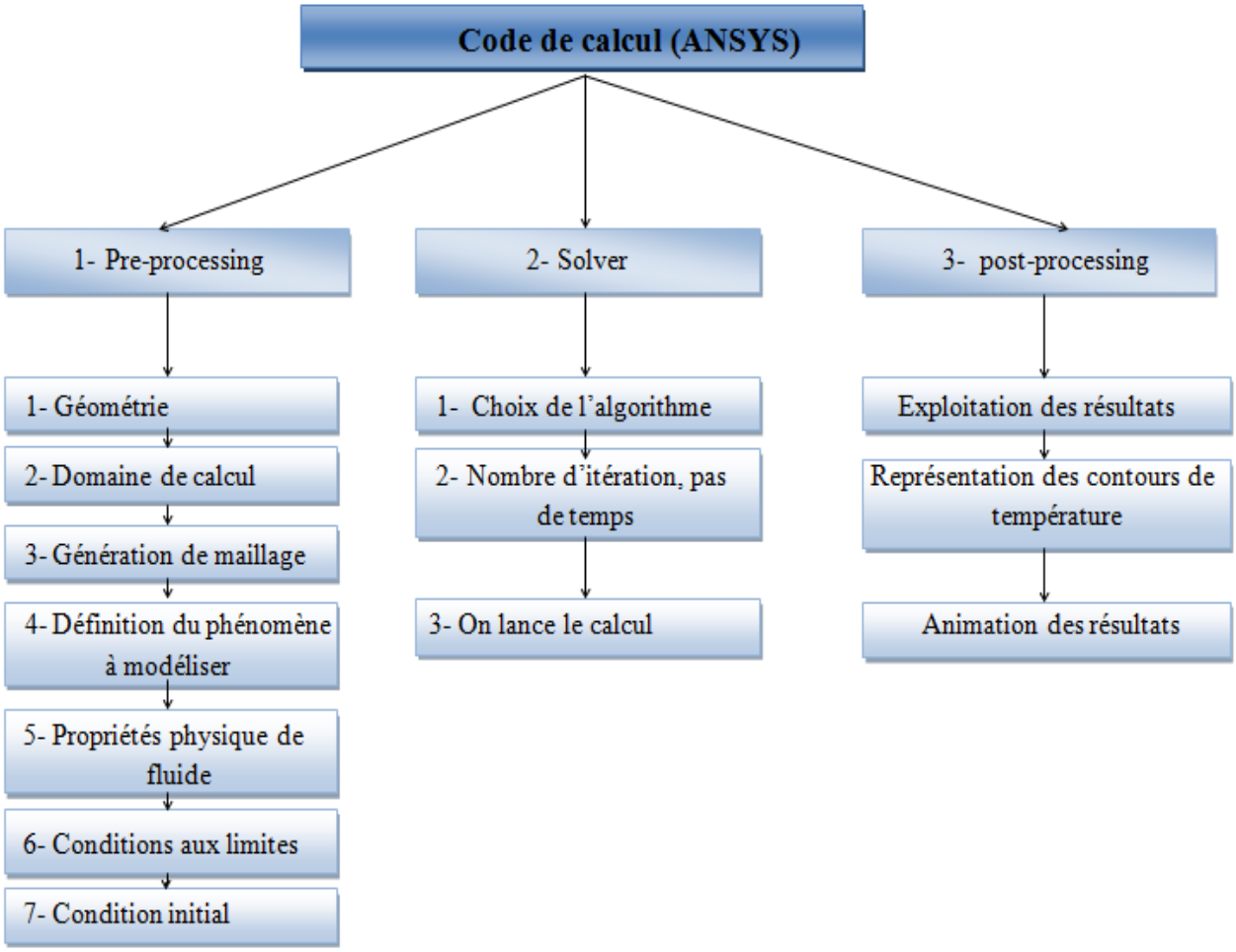


Figure IV.1 Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.2 Matériaux utilisés

Dans cette étude numérique on est intéressé à des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un (substrat métalliques acier d'outil H13) le choix de l'aluminium a été orienté par des nombreuses études déjà menées, telle que les travaux expérimentaux M. Xue et al [69] qui sont consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'aluminium sur substrat en acier, et qui sera l'objet d'identification de ce travail**.**

IV.2.1 l'aluminium

Parmi les performances mécaniques et thermiques, que présente l'aluminium on cite :

➢ Une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de $1.09.10^{6}$j/kg.

➢ Une bonne résistivité électrique >1012 Ohm.m[70]

➢ Une dureté HV sous une charge de 1N de 9.21 GPa [70]

➢ Une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de $4.10^{-5}mm^3/N.m$, à l'abrasion par une bille de sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5N à température ambiante, ce taux d'usure augmente jusqu' à $3.10^{-3}mm/N.m$ lorsque la température augmente à 400°C[70].

➢ Une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux alcalins, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance à l'oxydation. Ces performances font de ce matériau l'objet de nombreuses applications dans des domaines très variés :

➢ Les applications mécaniques, l'aluminium est l'abrasif le plus répandu àcôté du carbure de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides [70].

➢ Les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion à haute températures [70].

➢ Les applications médicales: le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie [70].

➢ Les applications électriques et électroniques: l'aluminium est utilisé dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation [70]

➢ Les application optiques: les films d'aluminium permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires.

IV.2.2 Propriétés des particules à l'impact

Pour le calcul numérique on a utilisé les propriétés thermo physique, illustrés dans le tableau IV.1 ci-dessous [69] :

Tableau IV.1 Les prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés [69].

Propriétés	Particule:Alumine	Substrat:Acier	Couche d'oxydation(Fe_2O_3)	unité
Densité	2570	7800	5240	(Kg/m³)
Viscosité (liquide)	°c 0 4.5 E-7 700 4 E-7			(m²/s)
Conductivité thermique	70	26	2.9	(W/m K)
Chaleur spécifique liquide	1000		670	(J/Kg K)
Chaleur spécifique liquide	°c 400 144 500 147 630 70			(W/m K)
Chaleur spécifique	°c 100 400 300 500 400 800 570 1050 580 1038	°c 20 460 200 502 500 550		(J/Kg K)

IV.3 Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue

IV.3.1 Identification

Pour l'identification, où l'objectif est de justifierle model utilisé ; on propose pour cette première partie de ce travail de comparer les résultats obtenus de simulation d'impact de goutte sur un substrat dans les mêmes conditions des travaux numérique et expérimental de M. Xue et al [69].

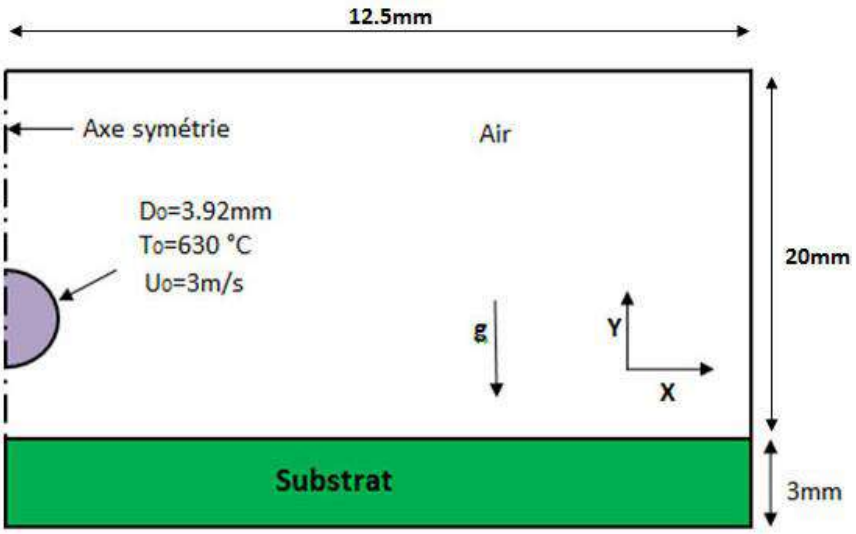


Figure IV.2 Configuration géométrique et conditions d'étalement de

L'identification

La figure IV.3 représente les résultats de simulation de l'impact d'une particule en aluminium d'un diamètre de 3.92mm initialement à une température de 630ºC et impactant avec une vitesse de 3 m/s sur un substrat en acier préchauffé à 200ºC. La gouttelette commence à se propager à 0.1 ms, le liquide suit la topographie de la surface.

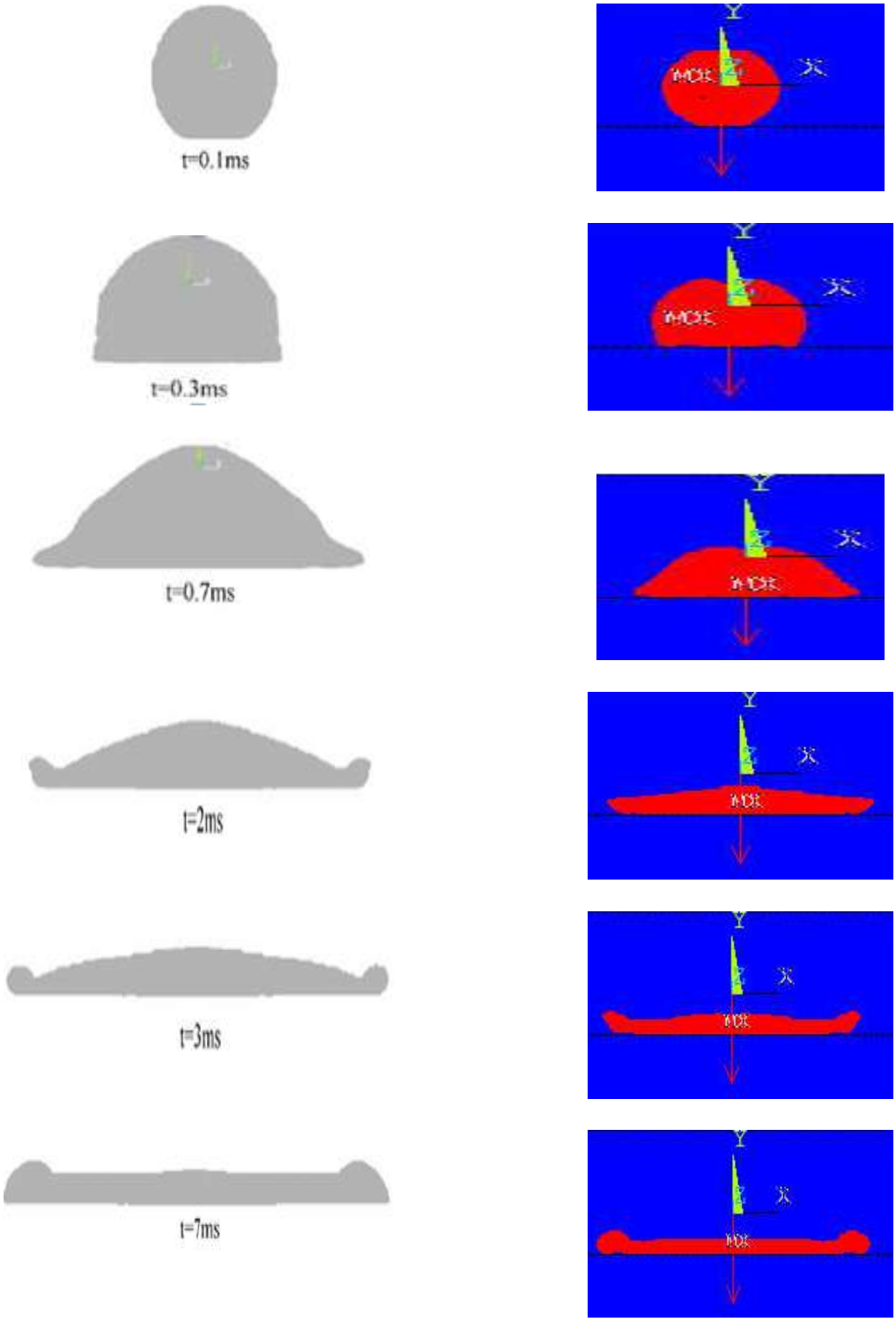


Figure IV.3 Impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement

La figureIV.4 représenteune comparaison des facteurs du présent travail avec l'expérimentale de M. Xue et al [69]. On trouve que l'étalement et la forme de la goutte sont semblables au cours de l'impact. À l'instant t =7 ms, la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement final (correspond à un facteur de 3.5 pour les deux cas). Les résultats du modèle présenté sont très proches des autres auteurs [69].

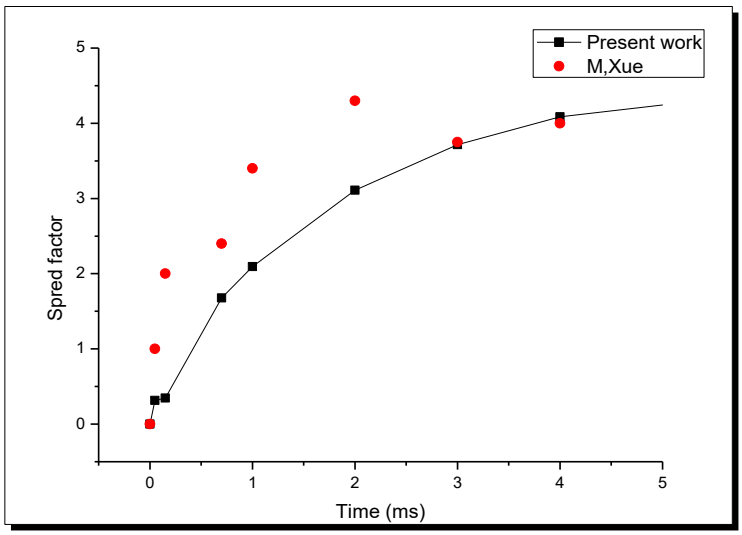


Figure IV.4 Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions.

IV.4 Impact d'une particule d'aluminium partiellement fondue

IV.4.1 Description du domaine d'application

Dans cette étude on propose de simuler et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact d'une particule en aluminium partiellement fondue présenté en quatre cas (0% -25% -50% -75%) sur un substrat préchauffé à 200°C et pré-oxydé.

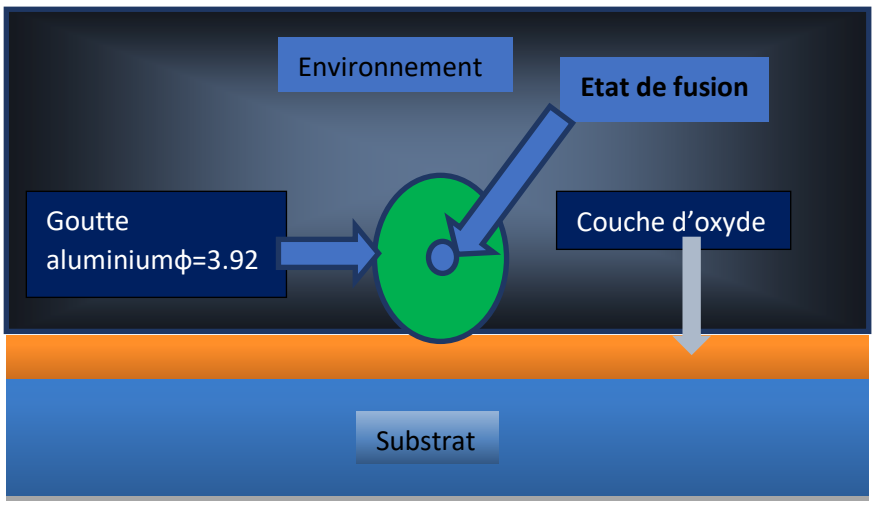
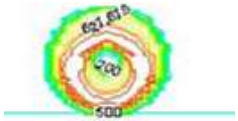
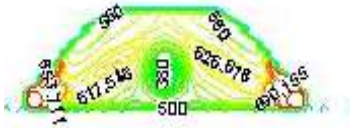
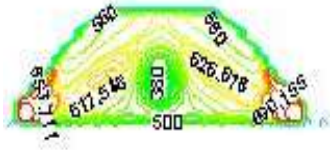
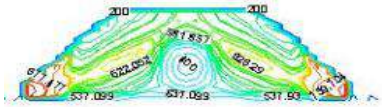
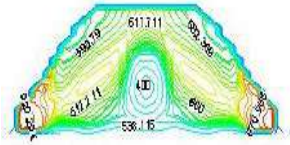
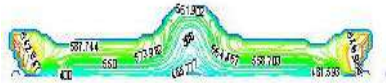
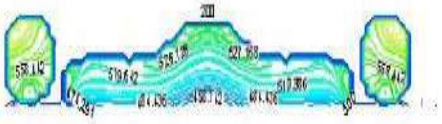
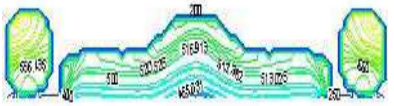


Figure IV.5 Schéma de description du domaine d'application

Le tableau IV.2, représente la distribution de la température pendant l'impact d'une gouttelette partiellement fondue sur un substrat préchauffé et oxydé. Le préchauffage conduit à une transition dans la morphologie des splats de la forme "splashée" à une forme de disque S.Tahar [71]. Dans un splat d'aluminium partiellement fondue, il est possible d'observer trois zones bien distinctes. Une première zone épaisse, au centre du splat, qui correspond à l'impact initial et se diffère d'un pourcentage à l'autre, entourée d'une zone moins épaisse en deux vagues successives S.Ansar [72].La goutte est rapidement solidifiée pour les faibles

pourcentages et le métal non fondue a empêché la particule de glisser sur la surface du substrat. Donc on peut dire que, le cisaillement d'amincissant et la distribution de la température interne affecte principalement la forme finale de la lamelle.

Tableau IV.2 Représentation spatiale du refroidissement de la particule pendant la formation des lamelles.

Goutte	0%	25%	50%	75%
0.05 ms				
0.15ms				
0.7ms				
3ms				
8ms				

La figure IV.6 représente une comparaison entre les facteurs d'étalement des quatre cas où on peut dire finalement que le faible coefficient d'étalement est dû au métal non fondue M. Zirari [73], C'est-à-dire, plus le pourcentage de l'état de fusion des particules présent dans la goutte est petit plus l'étalement est faible qui est marqué par l'éclaboussure dans le cas de 25%.

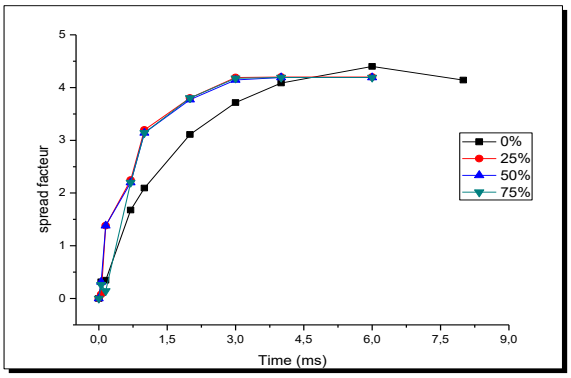


Figure IV.6 Comparaison entre les facteurs d'impact pour les quatre cas.

Dans la figure IV.7 qui représente une comparaison des profils de température au point de contact pour les quatre cas. On constate que la goutte est rapidement solidifiée pour le métal non fondu à faible pourcentage, cependant, la particule partiellement fondue à grand pourcentage a empêché la particule de glisser sur la surface du substrat par le fait de son énergie interne. On note que, la température de substrat augmente un peu plus dans le cas de75% et attient T≈550°C que dans les deux autres cas 25% (T=480°) et 50% (T=465°C). Et onnote une température plus moins que dans 0% (T=455°C).

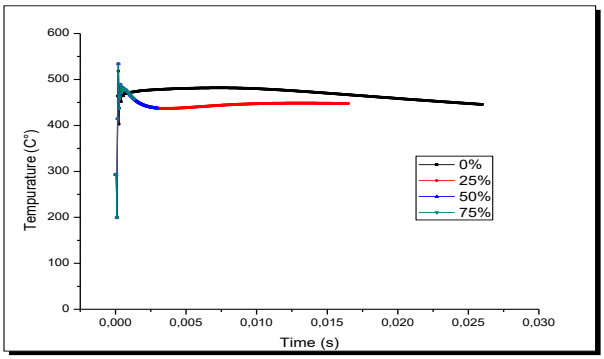
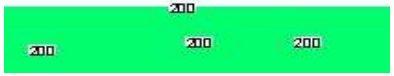
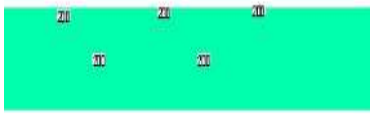
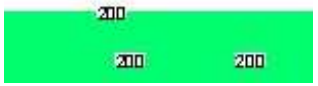
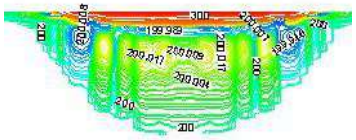
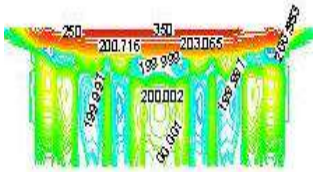
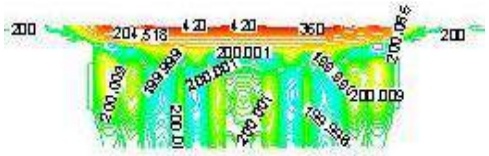


Figure IV.7 Comparaison entre les profils de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas.

Après un étalement partiel, la surface de contact entre le substrat et la goutte augmente, alors que la température du substrat reste quasi-constante (voir tableau IV.3). Pour les positions dans le substrat au-dessous (figure IV.8), la température du substrat augmente beaucoup plus lentement, alors que la température de surface de la gouttes 'abaisse, donc la résistance de contact associée augmente, qui favorise la diffusion thermique radial dans la lamelle

Tableau IV.3 Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat préchauffé et pré-oxydé.

	0%	25%	50%	75%
0.05				
0.15ms				
0.7ms				
3ms				
8ms				

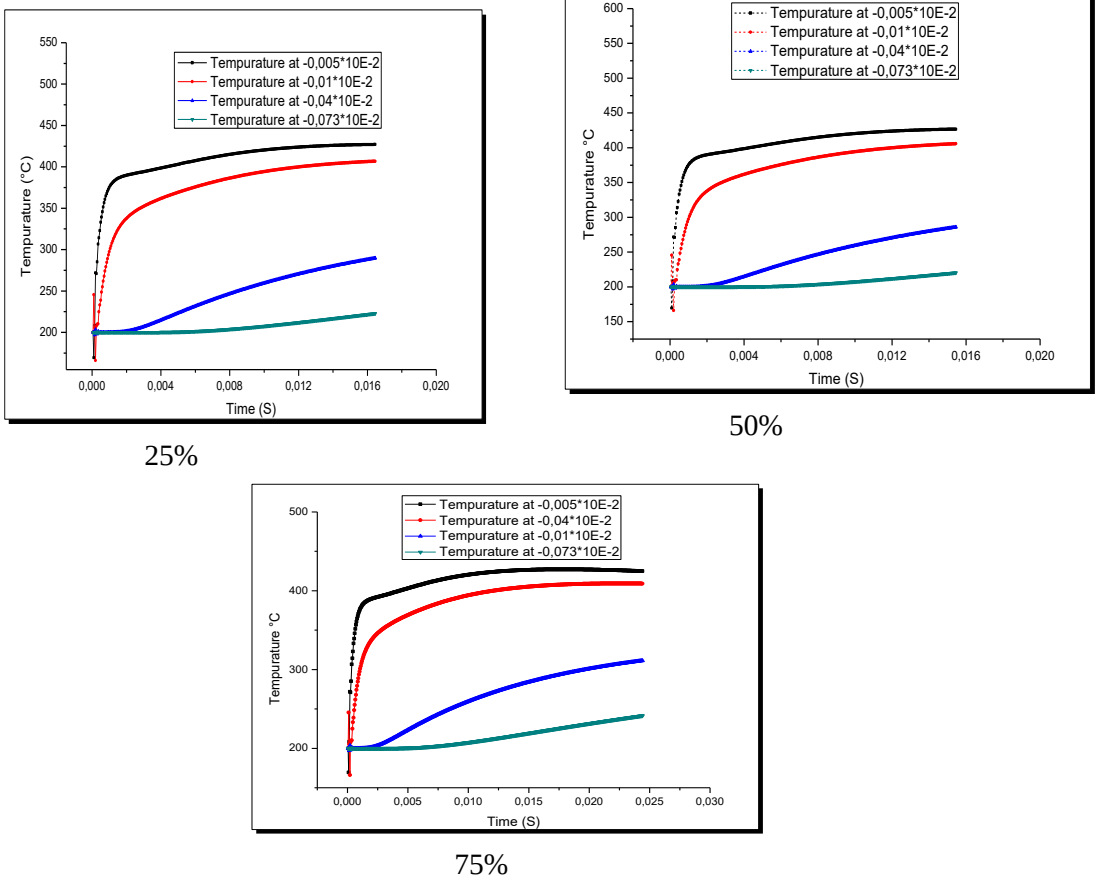


Figure IV.8 Allure de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat.

La figure IV.9 représente une comparaison des allures de pression au point d'impact pour les quatre cas. Où il est clairement marquant que, la pression de stagnation est plus élevée à l'impact, d'où une bonne interaction goutte/substrat, qui remette le transfert de chaleur transversale vers le substrat et non pas radialement dans la lamelle, l'augmentation de la pression d'impact sur la figure IV.8 est importante pour le cas de 75 % non fondue, favorise la collision de la lamelle sur le substrat. On peut dire donc que l'état de fusion de la particule est plus efficace pour l'amélioration de l'adhérence d'un dépôt.

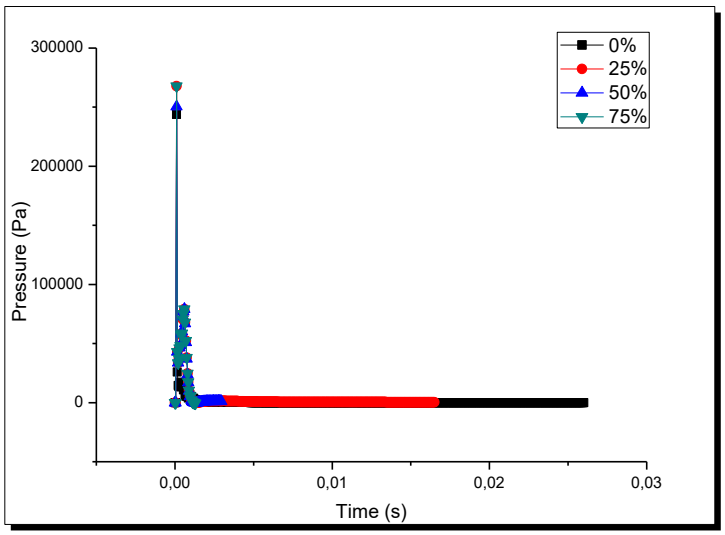
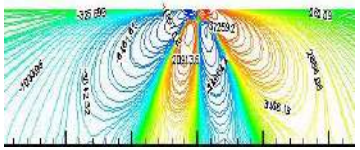
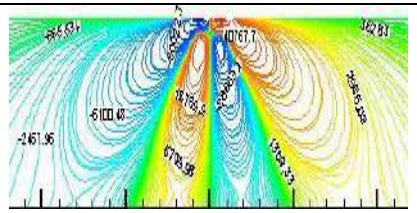
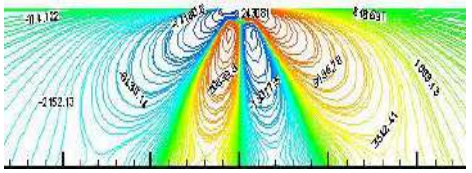
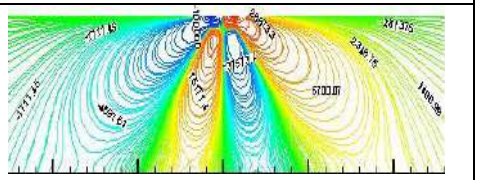
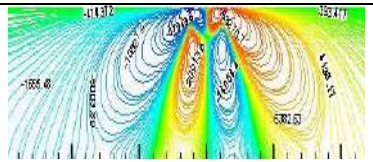
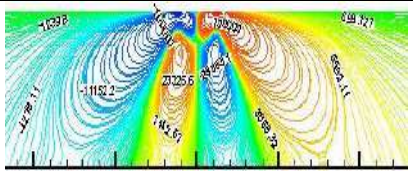
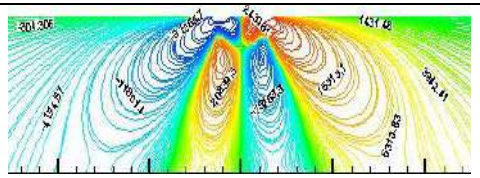
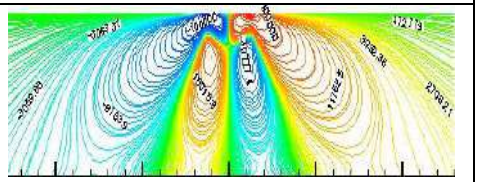
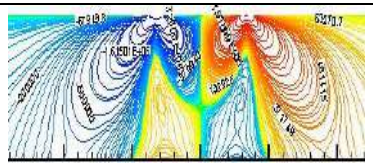
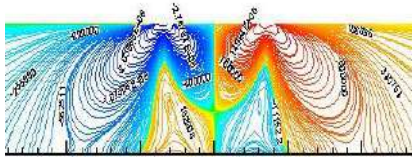
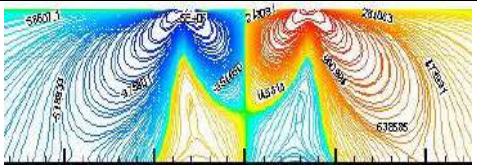
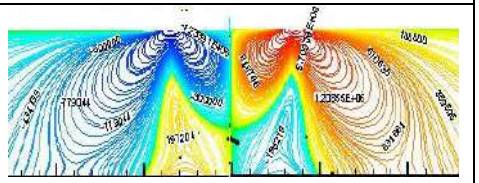
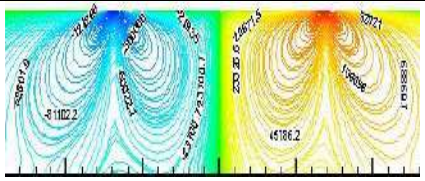
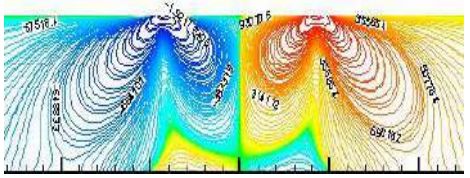
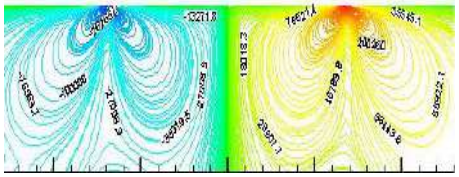
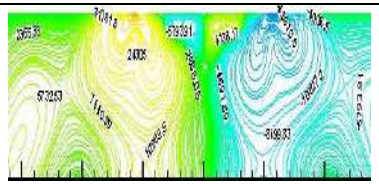
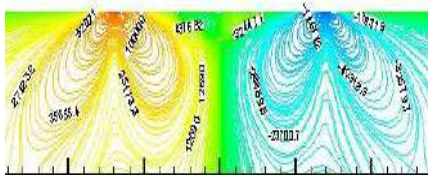
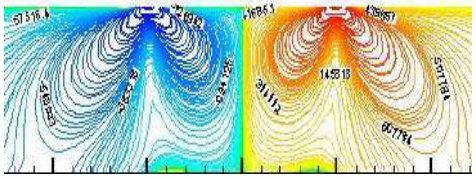
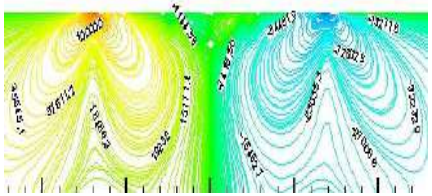


Figure IV.9 Comparaison de la variation de la pression au point d'impact Pour les quatre cas.

- **Déformation et concentration de contraintes sur le substrat**

La concentration de contraintes sur le substrat et les déformations sont inspectées ici pour donner un aspect mécanique explicatif de l'interaction particule/substrat (voir tableau IV.4). Dans la figure IV.10, qui représente la déformation au point d'impact dans le temps pour différentes épaisseurs de la couche d'oxyde. Il convient de noter que la déformation des particules après l'impact contre le substrat et pendant l'épandage donne un cisaillement par frottement des couches minces adjacentes à la surface au niveau de la zone environnante. L'interaction de ces couches près de la surface génère la contrainte de traction résiduelle près de la surface à proximité. Le niveau de stress est élevé (voir figure IV.11) lorsque la vitesse est importante et qu'elle se propage radialement sur l'interface de contact et presque avec la même intensité. La présentation spatiale des contraintes développées dans le substrat montre également une symétrie d'intensité et de déplacement avec les bords de la particule

Tableau IV .4 : Déformation au point d'impact dans le temps pour les Quatre cas.

	0%	25%	50%	75%
0.05ms				
0.15ms				
0.7ms				
3ms				
8ms				

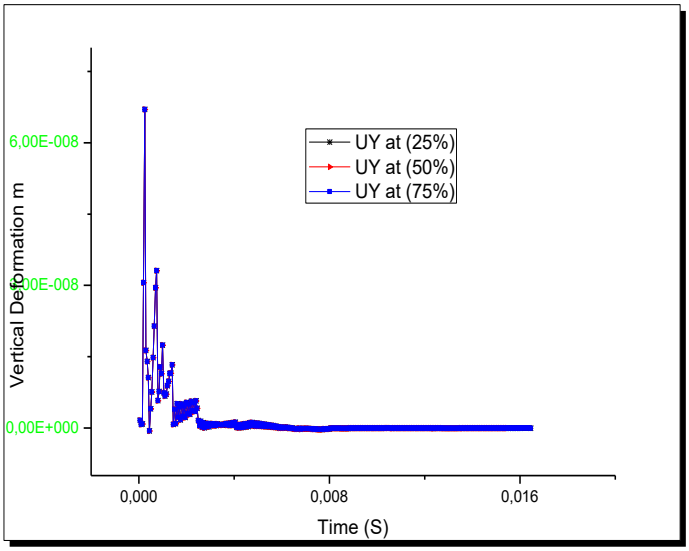
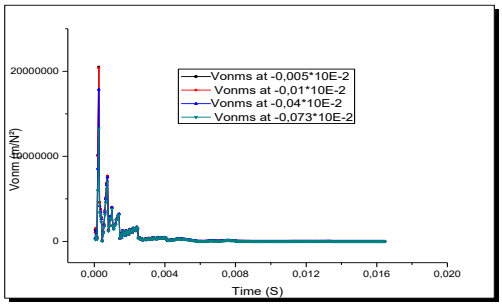
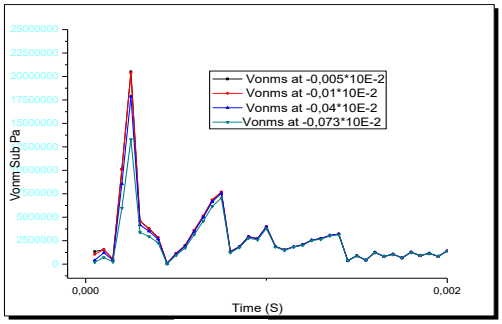


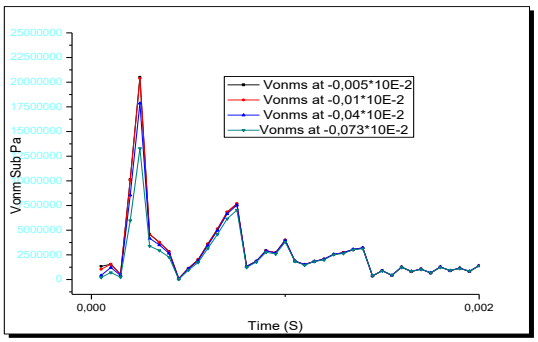
Figure IV.10 Déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas



25%



50%



75%

Figure IV.11 Von messes stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps.

Conclusion

Les résultats issus du modèle numérique présentés dans cette partie examinant le comportement des particules partiellement fondues montrent l'effet des différents paramètres mis en jeu sur le processus d'étalement et de la solidification des lamelles d'aluminium partiellement fondues déposées sur des substrats métalliques (acier) préchauffés et pré-oxydés. L'ensemble de ces résultats permet de montrer que

- L'état de fusion de la goutte influence la rapidité déformation d'une lamelle finale. Les phénomènes thermiques et mécaniques peuvent modifier cette évolution, par l'intervention de la solidification du métal.

- La solidification est liée au transfert de chaleur entre la lamelle et le substrat, ce transfert dépend de la qualité du contact lamelle-substrat. L'énergie emmagasiné dans La particule conduit à une vitesse de refroidissement élevée, d'où une solidification rapide avec une morphologie lamellaire non totalement étalée.

- La pression d'impact de la particule a une importance sur l'adhérence à la paroi, cependant les particules partiellement fondue génère une pression relativement importante par leur temps d'application, donc l'état de fusion empire la qualité de l'adhérence substrat/dépôt.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a été principalement consacré à la simulation numérique des phénomènes de la projection par plasma de dépôts d'aluminium par la méthode EF/VOF en utilisant la méthode d'interaction fluide structure (FSI), à l'étude de leurs propriétés morphologiques et thermique reliées à l'impact et la solidification rapide d'une particule partiellement fondue sur un substrat préchauffé et pré-oxydé.

Dans le premier chapitre, on a étudié la projection thermique, ses paramètres et ses caractéristiques, avec le traitement thermique des particules dans le jet. Les interactions plasma-particules. La théorie de l'adhésion qui suscite encore de nos jours des interrogations. De plus, la préparation de surface, rugosité et adhésion**.** Quantification de l'adhérence des revêtements. Ainsi que le domaine d'utilisation dans les secteurs industriels.

Dans le deuxième et troisième chapitre, on a décrit les équations et les méthodes numériques qui expliquent le phénomène physique de l'étalement avec solidification des particules sur substrat.

Dans le dernier chapitre, les simulations sont réalisées en 2D cartésien tout d'abord sur un cas de validation afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, puis sur l'impact de particule d'aluminium partiellement fondue sur un substrat d'acier à outil H13 en présence de couche d'oxyde et en utilisant la méthode FSI, les résultats obtenues montrent que les paramètres étudiés jouent un rôle important sur la morphologie finale du lamelle, la projection de particule (goutte) sur un substrat est une technique largement utilisée dans l'industrie.

Les résultats numériques ont montré que :

- L'état de fusion de la goutte influence la rapidité déformation d'une lamelle finale. Les phénomènes thermiques et mécaniques peuvent modifier cette évolution, par l'intervention de la solidification du métal.

- La solidification est liée au transfert de chaleur entre la lamelle et le substrat, ce transfert dépend de la qualité du contact lamelle-substrat. L'énergie emmagasiné dans La particule conduit à une vitesse de refroidissement élevée, d'où une solidification rapide avec une morphologie lamellaire non totalement étalée.
- La pression d'impact de la particule a une importance sur l'adhérence à la paroi, cependant les particules partiellement fondue génère une pression relativement important par leur temps d'application, donc l'état de fusion empire la qualité de l'adhérence substrat/dépôt.

Les perspectives immédiates de ce travail sont relatives à la mise en place de la simulation 3D de l'écoulement de jet plasma et de l'impact de gouttes, et l'interaction plasma particule le long de l'écoulement jet de plasma par le code ANSYS, et on recommande d'étudier le comportement de l'impact de deux gouttes successives.

Rréférences

[1] Hamide, M., Gök, Y., Demir, Y., Yakalı, G., Tok, T. T., Aktaş, A., ... & Gülçin, İ. (2022).

entafluorobenzyl-substituted Benzimidazolium Salts: Synthesis, Characterization, Crystal Structures, Computational Studies and Inhibitory Properties of Some Metabolic Enzymes. Journal of Molecular Structure, 133266.

[2]Zirari, M., El-Hadj, A. A., & Bacha, N. (2010). Numerical analysis of partially molten splat during thermal spray process using the finite element method. Applied Surface Science, 256(11), 3581-3585.

[3]FODJO, G. J. K., MAKANI, S. R., & TONYE, A. F. (2021). Fonction approvisionnement et création de valeur dans l'entreprise: Une étude exploratoire dans le contexte camerounais. Alternatives Managériales Economiques, 3(4), 62-82.

[4]Mebdoua, Y. (2008). Etude numérique des Phénomènes thermiques contrôlant la solidification d'une lamelle en projection thermique: application à la formation du dépôt (Doctoral dissertation, Limoges).

[5]Le Bot, C. (2003). Impact et solidification de gouttes métalliques sur un substrat solide (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).

[6]Aalami-Aleagha, M. E., Madaeni, S. S., & Daraei, P. (2009). A new application of thermal spray in preparation of metallic membrane for concentration of glucose solution. Journal of thermal spray technology, 18(4), 519-524.

[7]Nguyễn, Đ. T., & Lê, H. D. (2018). Một số yếu tố ảnh hưởng đến không gian cư trú nông thôn ven biển duyên hải Bắc Bộ thích ứng biến đổi khí hậu.

[8]FerjaniHanene, L., Ben Ammar, L., Maatallah, K., Ben Nessib, D., Triki, W., Kaffel, D., & Hamdi, W. (2022). Enthesitis-related arthritis and spondylarthritis: the same disease or disparate entities?. Expert review of clinical immunology, 18(1), 93-99.

[9]Franci, A., & Cremonesi, M. (2017). On the effect of standard PFEM remeshing on volume conservation in free-surface fluid flow problems. Computational Particle Mechanics, 4(3), 331-343.

[10]Jia, D., Liu, Y., Yi, P., Zhan, X., Ma, J., & Mostaghimi, J. (2020). Splat formation mechanism of droplet-filled cold-textured groove during plasma spraying. Applied Thermal Engineering, 173, 115239.

[11] A. Proner. «Revêtement par projection thermique» .Techniques de l'ingénieur M 1645, 1999.

[12] 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.

[13] M. RAHMANE, G. SOUCY, M.I. BOULOS, Enthalpy probe calibration and measurements under plasmaconditions, Plasma Chem. & Plasma Process., 16 (1), pp 169S-190S (1996)

[14] P. FAUCHAIS, J. COUDERT, M. VARDELLE, A. VARDELLE, A. DENOIRJEAN, Diagnostics of thermal spraying plasmajets, in Plasma Spraying-Theory and Applications, (ed.) R. Suryanarayanan, (pub.) World Scientific Pub. Co.,Singapore, pp 61-94 (1993)

[15] P. FAUCHAIS, J.F. COUDERT, M. VARDELLE,Diagnostics of plasma processing, in Plasma Diagnostics, (pub.)Academic Press, Boston, USA, pp 349 (1989)

[16] C. BONET, Thermal plasma processing, Chemical Engineering Progress,pp 63-69. (1976)

[17] J. MOSTAGHIMI, P. PROULX, M. I. BOULOS, Modeling of the thermal treatment of powders in a plasma jet underdense loading conditions, in Proc. International Symposium on Plasma Chemistry 8, (ed.) K. Akaski, A.Kinburn, (pub.) University of Tokyo, 1, pp13-19. (1987)

[18] P. FAUCHAIS, A. VARDELLE, Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying, Int.J. Therm. Sci., 39,pp 852-870 (2000).

[19] J. L. ENGELKE, Heat transfer to particles in plasma, in A. I. Ch. E. meeting, Los Angeles, USA, (1962).

[20] B. PATEYRON, M.F. ELCHINGER, G. DELLUC, P. FAUCHAIS, Thermodynamique and transport propretés of Ar-H2 andAr-He plasma gases used for spraying at. Atmospheric pressure : Properties of mixtures, Plasma Chem. AndPlasma Proc., 12(4), pp 421 (1992).

[21] S. JANISSON, A. VARDELLE, J. F. COUDERT, E. MEILLOT, B. PATEYRON, P.FAUCHAIS, Plasma spraying using Ar-He-H2 gas mixtures, J. Thermal Spray Technology, 8 (4),pp 545-552 (1999).

[22] N.J. THEMELIS, Transport and chemical rate phenomena, (pub.) Gordon and Breach,(1995).

[23] E. PFENDER, Heat transfer in thermal plasmas, in Proc. Julian Szekely Memorial Symposium on MaterialsProcessing, Cambridge, Massachusetts, 5-8 October 1997, (ed.) H.Y. Sohn, J.W. Evans, D. Apelian, (Pub) TMS,(1997).

[24] A. VARDELLE, Etude numérique des transferts de chaleur, de quantité de mouvement et de masse entre un plasma d'arc à pression atmosphérique et des particules solides, Thèse de Doctorat, Université de Limoges,France, n° d'Ordre 29-87, (1987).

[25] E. PFENDER, C.H. CHANG, Plasma spray jets and plasma particulate interactions: modeling and experiment, in Thermal Spray : Meeting the Challenges of the 21st Century, (ed.) C. Coddet, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA,pp 315-327 (1998).

[26] K.I. LI, M. VARDELLE, A. VARDELLE, P. FAUCHAIS, C. TRASSY, Vaporization ometal powders in plasma spraying, in Thermal Spray : Practical Solutions for Engineering Problems, (ed.) C.C. Berndt, (pub.) ASMInternational, Materials Park, OH, USA, 1996, pp 457-552

[27] J.L.Lebrun, M.Zaouali, M. Houhou. «Mesure de l'adhérence des revêtements projetés par plasma et canon à détonation » Rapport ENSAM, Paris 1990.

[28] M.C.Mate. «Tribology on the small scale » A bottom up approach to friction, lubrication and wear. Oxford université presse, Oxford, 2008.

[29] R.Gras. «T tribologie-principes et solutions industrielles » Mécanique et matériaux. Dunod Paris, 2008.

[30] M.GRUJICIC, L.ZHAOC, DEROSSET W.S., HELFRITCH D., Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic spray process, Materials and Design, 25, 2004, p. 681-688

[31] H. WEISS, Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment, Surface and Coatings Technology, 1995, 71, p. 201-207

[32] EBNESAJJAD S., Handbook of adhesives and surface preparation, technology, applications and manufacturing, Elsevier, 2011

[33] R.KROMER, S. COSTIL, CORMIER J., BERTHE L., PEYRE P., COURAPIED D., Laser surface patterning pre-treatment before thermal spraying – a way to adapt and control the surface topography to the considered materials and the stresses imposed, in: Proceedings of the International Thermal Spray Conference (ITSC) 2015, 11-14 May, Long Beach, California, 2015, p. 120-128

[34] S. GOJON, Etude sur elaboration et la characterization de revetments en alliages d'aluminium et de magnésium par projection dynamique à froid pour la réparation de pieces aéronautiques, Thèse de doctorat, (me moiré provisoire), Université de Technologie Belfort-Montbéliard, Octobre 2015

[35] P. W. Atkins, M. Monnet, J. Paula. « Chimie physique ». De Boeck université, 2004

[36] P. Fauchais, « Understanding plasma spraying », J.Phy.D:Appl.Phys.,Vol.37,nº9,pp.86108,1989.

[37] F.Dandan. « Diagnostic et adaptation des trajectoires robotiques en projection thermique »Ph.D., Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 142, 2010.

[38] C.Moeau, J.F. Bisson, R.S. Lima, B.R. Marple. « Diagnostic for advanced materials processing by plasma spraying» . 2005

[39] G.Beranger, J.C.Charbonnier. « La notion de surface », le livre de l'acier, chapitre 20, librairie Lavoisier, 506-531, 1994.

[40] ://www.sulzermetco.com/tech/tip13.html

[41].E. LUGSCHEIDER, L.ZHAO, A.FISCHER, Reactive plasma spraying oftitanium, Advanced Engineering Materials 2, N°5, p. 281-284 (2000)

[42] C. MARCHAND, Nitridation of Ti-6Al-4V powder in thermal plasma Conditions and sintering of obtained TiN powder, Surface and Coating Technology 201, 2006)

[43] A. Vardelle, Etude numérique des transferts de chaleur, de quantité de mouvement et de masse entre un plasma d'arc à pression atmosphérique et des particules solides. Thèse de Doctorat es sciences physiques de l'Université de Limoges, n° d'ordre 29-87 (1973)

[44] Y. C. Lee, Modeling work in thermal plasma processing, Ph. D Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA, July (1984)

[45] X. Chen, E. Pfender, Effect of the Knudsen number on heat transfer to a particle immersed into thermal plasma, Plasma Chemistry and Plasma Processing. 3 (1), p 97-114, (1980)

[46] P. Han, X. Chen, Modeling of the supersonic argon plasma jet at low gas pressure environment, Thin Solid Films,390, Issues 1-2, p 181-185, (2001)

[47] M.I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, Thermal plasma, Fundamentals and applications, 1, Plenum Press, New York (1995)
[48] W.E. Ranz, W.R. Marshall, Evaporation from Drops, Part II, Chem. Eng. Progr., 48, , p 173-180, (1952)

[49] M. N. Ozisik, Heat Transfer, 2ème Edition, New York: Wiley-Interscience Publication, (1993)
[50] V. R. Voller, M. Cross, Accurate solutions of moving boundary problems using an enthalpy method, Int J. Heat Mass Transfer, 24, p 545-556, (1981)
[51] H. Carslaw, J. Jaeger, Conduction of heat in solids, (Ed.) Oxford : ClaredonPress, (1959)
[52] K. El Omari, Etude de la convection autour d'un nodule sphérique contenant un matériau à changement de phase au cours de sa cristallisation, Thèse de l'université de Pau et des Pays de l'Adour, (2001)

[53] H.CARSLAW, J. JAEGER, Conduction of heat in solids, (Ed.) Oxford :ClaredonPress, (1959)

[54] M. BOUNDER, M. EL GANAOUI, B. PATEYRON, P. FAUCHAIS .Thermal modelling of composite iron/alumina particles sprayed under plasma conditions. parti : pure conduction. journal of high temp. material processes**,** volume 7, issue 4, pp. 547-558 (2003)

[55] A. MCDONALD, M.LAMONTAGNE, C.MOREAU, S.CHANDRA, Impact of plasma-sprayed metal particles on hot and cold glass surfaces, Thin Solid Films, Vol. 514, pp. 212–222. (2006).
[56] Y. HEICHAL., CHANDRA S., Predicting Thermal Contact Resistance between molten metal droplets and a solid surface, J. of Heat Transfer, Vol. 127 (11), pp. 1269-1275. (2005).

[57] A.Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, and M. Guagliano,A hybrid approach to determine critical and erosion velocities in the cold spray process, Applied Surface Science, vol. 273, 61- 624 (2013).

[58] A. ABDELLAHEL-HAD, Modilisation de l'interaction particule –gaz pendant la projection thermique, Thèse de doctorat de l'université de Blida,(2004)

[59] Chandra, S., & Avedisian, C. T. (1991). On the collision of a droplet with a solid surface. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 432(1884), 13-41.

[60] Jones, H. (1997). How I Became Hettie Jones. Grove Press.

[61] Irie, T., Kaneko, Y., Nakajima, T., Saito, A., & Kurabayashi, M. (2010). QT interval prolongation 365-366. and torsade de pointes induced by propofol and hypoalbuminemia. International heart journal, 51(5),

[62] 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.

[63] 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.

[64] 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.

[65] 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

[66] Souchet, D., & Piffeteau, S. (2001). Approche par la MEF de la lubrification thermoélastohydrodynamique des paliers de tête de bielle. Revue Européenne des Eléments, 10(6-7), 815-847.

[67] Zhang, Y. (2014). Liu. R. k., Deng, W., Khanal, NR, Gurung, DR, Murthy, MSR, and Wahid, S.: Characteristics of landslide in Koshi River Basin, Central Himalaya, J. Mt. Sci, 13, 1711-1722.

[68] F. KARL BENRA, H. JOSEF DOHMEN, J. PEI, S. SCHUSTER, AND B.WAN. A Comparison Of One-Way And Two-Way Coupling Methods For Numerical Analysis Of Fluid-Structure Interactions. Journal of Applied Mathematics Volume 2011, Article ID 853560, 16 pages doi:10. 1155/2011/853560

[69]Khan, S., Siddique, R., Shereen, M. A., Ali, A., Liu, J., Bai, Q., ... & Xue, M. (2020). Emergence of a novel coronavirus, severe acute respiratory syndrome coronavirus 2: biology and therapeutic options. Journal of clinical microbiology, 58(5), e00187-20.

[70]H. S CARSLAW, J.C.JAEGER, Conduction of heat in solids, 2nd ed. Clarendon Press Oxford. (1959).

[71] Soualhia, M., Khomh, F., & Tahar, S. (2017). Task scheduling in big data platforms: a systematic literature review. Journal of Systems and Software, 134, 170-189.

[72]Mudalige, T., Qu, H., Van Haute, D., Ansar, S. M., Paredes, A., & Ingle, T. (2019). Characterization of nanomaterials: Tools and challenges. Nanomaterials for food applications, 313-353.

[73]Danouni, S., El-hadj, A. A., Zirari, M., & Belharizi, M. (2016). A thermo-mechanical analysis of a particle impact during thermal spraying. Applied Surface Science, 371, 213-223.