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 de la matière
Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master
En Génie mécanique
Option : Ingénierie des matériaux et des surfaces

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

Présentée par :

- AROUSSI Abd-el-Kader
- BOUREGHAYA Lakhdar

Proposé et dirigé par :

- Dr TAHAR Souad
- Dr ZIRARI Mounir

Promotion 2021/2022

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH le tout puissant miséricordieux qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces Longues années d'étude Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire. Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences et technologie, département génie mécanique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée. Nous tenant à remercier sincèrement Madame **TAHAR Souad**, et Monsieur **ZIRARI Mounir**, qui en tant que promotrice et Co-promotrice de ce mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

DEDICACE:

Je dédie ce modeste travail :

A la lumière de ma vie, mon père "BEN SALEM" ma grande lumière qui illumine ma vie et qui me donne encore l'espoir et pour le simple fait qu'elle soit ma mère "FADHILA". La douceur et la sagesse, qui ont toujours veillé sur ma réussite, je les remercie pour leur soutien et leur sacrifice, et je prie dieu pour les garder pour moi.

Je dédie ce fruit de deux ans de labeur pour ma très chère fiancé "BOCHERA" qui m'as soutenu et resté à mes côtés même dans les moments les plus difficile.

A mes très chers frères "RAFIK","ADEL", "RIDA "et "ABD EL HAK " qui ont consacré tous leurs efforts pour m'aider à compléter ce travail.

A mes chères sœurs ""AMEL" et "NARIMANE" pour leurs encouragements et leur amour.

A toute ma famille, paternelle "AROUSSI " et maternelle "MAHMOUDI"

Grande et petite sans exception.

A mon binôme BOURGHAYA LAKHDER et toute sa famille.

à mes meilleurs amis " ABD EL HAK AOUFI, FAROUK, ISLAM et SOFIAN» que je les aimaient et j'ai passé les meilleurs moments de ma vie avec eux

A tous mes amis que mon crayon l'ont oublié mais ils sont toujours présents dans mon cœur.

A tous mes amis avec qui j'ai passé mes études

Dédicaces

En premier lieu, je remercie Allah le tout puissant et le miséricordieux, de m'avoir donné la puissance pour réfléchir et écrire, le courage et la santé pour réaliser ce modeste travail, Dieu merci.

Je dédie ce modeste travail :

À ma précieuse et ma très chère Maman,

Qui a toujours été là pour moi, avec son extrême gentillesse, et son soutien dans les moments difficiles, son soin incroyable, ses paroles chaleureuses et ses précieux conseils, ses prières qui m'ont aidé à réussir et m'ont fourni le pouvoir de continuer. Que dieu tout le puissant te protège et te garde en bonne santé.

À mon cher père,

Source de tendresse et de patience. Que dieu t'accorde la santé.

À mes chers grands frères, ALI, HICHAM et KAMEL.

À mes sœurs, AYA et HIBA.

À mes chers frères, BILAL, REHIM, Mohammed et SALIM.

À mon binôme ABDELKADER AROUSSI,

Qui m'a beaucoup aidé pendant la réalisation de ce travail, avec ses très forts efforts et avec qui j'ai appris plein de choses, nous avons eu beaucoup de bons souvenirs. Je lui souhaite tous les succès et un avenir promoteur.

À tous ceux qui j'aime et qui me sont chères

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

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 تكسير جزيء الألومينا عدديًا على ركيزة فولاذية لأداة H13 بطبقة أكسيد ، باستخدام تقنية تفاعل بنية السوائل IFS ، وطريقة تحليل العناصر المحدودة وطريقة حجم السائل (VOF) بهدف فهم أفضل للظواهر المتعلقة بالسلوك الميكانيكي في واجهة الجسيمات السفلية 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. من خلال هذه الدراسة ، وجد أن سمك طبقة الأكسيد يؤثر 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 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 que l'épaisseur de la couche d'oxyde 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 the lifetime of plasma deposits largely depend 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 are crushed on the substrate. Therefore, in this work, we propose to numerically simulate the crushing of an alumina particle on a H13 tool steel substrate with an oxide layer, using the structure fluid interaction technique IFS, the finite element analysis method and the fluid volume method (VOF). in order to better understand the phenomena related to the mechanical behavior at the particle-substrate interface during the formation of lamellae. It predicts lamella morphology and possible spatter 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 the thickness of the oxide layer acts directly on the spreading and solidification of the lamellae formed.
Keywords: Deposition, lamella, impact, particle size, substrate, FSI, VOF, phase change, equivalent specifi cheat, finiteelements.

Liste des figures

Figure I. 1 Principe fondamental de la projection thermique **4**

Figure I. 2 Schéma d'un système du procédé projection par flamme **5**

Figure I. 3 Schéma d'un système du procédé projection par l'arc **6**

Figure I. 4 Illustration de l'accrochage mécanique du fait (a) de la morphologie du substrat et (b) des déformations plastiques de la particule et du substrat.. **11**

Figure I. 5 Représentation schématique de l'empilement des lamelles lord la projection plasma d'après **13**

Figure I. 6 Formation des contraintes résiduelles de traction **14**

Figure I. 7 Formation des contraintes résiduelles de compression **14**

Figure I. 8 Test d'Almen ("Almen strip test") **15**

Figure I. 9 Représentation des contraintes résiduelles de cisaillement **15**

FigureII.1 Aspects considérés dans le traitement d'une particule injectée dans un jet plasma. **21**

FigureII.2 Les composantes des contraintes agissant sur un cube élémentaire: (Projection sur le plan xy) **27**

Figure III.1 Approche de ligne de courant d'Upwind **34**

Figure IV.1 Schéma représente le code de calcul d'un logiciel Ansys **40**

Figure IV.2 Géométries de Substrat et Particules D'aluminium **42**

Figure IV.3 L'impact d'une particule en Aluminium d'un diamètre de 3.92mm Initialement a une Température de 630°C et une vitesse de 3m/s sur Substrat en Acier d'outil initialement a 200°C **44**

Figure IV.4 Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions ... **44**

Figure IV.5 Description du domaine d'application **46**

Figure IV.6 Comparaison entre les facteurs d'impact pour les quatre cas **46**

Figure IV.7 Comparaison des profils de température dans le temps pour quatre positions au point d'impact **47**

Figure IV.8 La variation de la pression d'impact pour les quatre cas **49**

Figure IV.9 Allure de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat.. **50**

Figure IV.10 Von messes stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps **52**

Figure IV.11 Déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas **53**

Liste des tableaux

Tableau III.1 Regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système **..... 32**

Tableau IV.1 Les prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés **..... 42**

Tableau IV.2 Représentation spatiale du refroidissement de la particule pendant la formation des Lamelles **..... 46**

Tableau IV.3 Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat préchauffé et pré-oxydé **..... 48**

Tableau IV.4 Représentation spatial des contraintes XY pour les trois cas**……. …... 51**

Liste des symboles

A	Surface de la Particule	m^2
a_1 ,a_2 ,a_3	Constante d'Eleur et Gear	-
a_E ,a_W ,a_P	Constantes de la Méthode des Volume Finie	-
Bi	Nombre de Biot	-
Br	Terme de Brinkaman	-
C	Fonction Couleur	-
C_p	Chaleur Spécifique	J/kg.K
C_D	Coefficient de Traînée Corrigé	-
$C_{D,C}$	Coefficient de Traînée	-
Cs ,Ct,Cm	Constantes de la Force Thermophorèse	-
C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$,σ_k ,σ_ε	Constante des modèles de turbulence	-

D	Diamètre de la Particule Etalée	m
Di	Coefficient de Diffusion de L'espèce	-
d_p	Diamètre de la Particule	m
E :	Champ Electrique	$V.m^{-1}$
E_k	L'énergie Cinétique	J
E_p	L'énergie Potentielle	J
f	Rapport de la Surface réelle de Contact à la Surface Nominale du Solide	-
F_{TS}	Forces de Tension de Surface	N
F_B	Force D'histoire de Basset	N
F_D	Force de Traînée	N
Fem	Force de Lorentz	$N.m^{-3}$
Fg	Force de Gravite	N
F_{ma}	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
G_k	Terme de Production de L'énergie Cinétique Turbulente	-
h	Enthalpie	J/kg
h	Coefficient de Convection	$W/m^2.K$
ΔH_F	Chaleur latente de fusion	$J.kg^{-1}$
ΔH_{vap}	Chaleur latente de vaporisation	$J.kg^{-1}$
I	Intensité Turbulente	-
K	Energie Cinétique Turbulente	m^2/s^2
k_B	Constante de Boltzman	$m^2kgs^{-2}K^{-1}$
K_e	Conductivité Effective	-
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_{liqude}	Conductivité Thermiques de liquide	W/m.K
$\overline{k}$	Conductivité thermique moyenne du Plasma	W/m.K
L_x , L_n ,L_c	Echelle de Longueur	-

L_{Pl} :	Chaleur Latente de Fusion	$J.kg^{-1}$
L_f	Travail de Dissipation Visqueuse	-
L_m	Chaleur Latente de Solidification de la Particule	$J.kg^{-1}$
L	Longueur efficace du jet plasma	m
M	Masse	kg
M	Masse du Mélange	kg
Nu	Nombre de Nusselt	-
P	Pression Statique	Pa
P_i	Pression Partielle du Constituant i	Pa
P_{tot}	Pression Totale	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Flux Thermique	$W.m^{-2}$
Q_{em}	Chaleur Fournie par Effet Joule	J
Q_{fusion}	Chaleur de fusion	J/kg
R_a	Rugosité de Surface	-
Re	Nombre de Reynolds	-
R_{sl}	Position de L'interface Solide-Liquide	m
R_{th}	Résistance Thermique de Contact	$m^2.K/W$
Sc	Nombre de Schmidt	-

S_H	Terme Source Enthalpique	-
St	Nombre de Stefan	-
S_{ij}	Tenseur des Déformations Symétriques	-
S_ϕ	Terme Source	-
T	Temps	s
T	Température	K
ΔT	Gradient de température de couche Limite	K
U	Constante de Solidification	-
U_r	Vitesse relative Entre le Fluide et la Particule.	m/s
u, v, w	Composants Cartésiennes du Vecteur Vitesse	m/s
U_v	Vitesse de la Vapeur	$m.s^{-1}$
V_X	Composante Moyenne de la Vitesse dans la Direction x	m/s
$V_X^{'}$	Fluctuant Composante de Vitesse dans la Direction x	-
ϑ_{Pl}	Vitesse du front de changement de phase solide-liquide	$m.s^{-1}$
ϑ_{lv}	Vitesse du front de changement de phase liquide-vapeur	$m.s^{1}$
y_i	Fraction Massique du Gaz i	-
W_e	Nombre de Weber	-
W_{ij}	Tenseur antisymétrique Rotation	-
τ	Tenseur de Contrainte de Cisaillement	$N.m^{-2}$
Ξ	Degré d'étalement	-
Ξ_m	Degré d'étalement Maximum	-
σ	Conductivité électrique	$\Omega^{-1}.m^{-1}$
Σ	Tension de surface	J/m^2
σ_R	Termes de contraintes de Reynolds	$N.m^{-2}$
ε	Dissipation turbulence	m^2/s^2
E_{mij}	Opérateur tensoriel alternance.	-
V	Vitesse moléculaire	m/s
λ	Libre parcours moyen des molécules du fluide	m
A	Diffusivité thermique	m^2/s
P	Masse volumique de la particule	kg/m^3
μ	Viscosité dynamique	kg.m/s
Γ	Rapport des chaleurs spécifiques	-

Γ_{ϕ}	Coefficient de transport	-
Ω	Taux de dissipation spécifique	-
ω_p	Module du vecteur rotation de la particule	rad/s
Φ	Coefficient de correction	-
Ωm	Vitesse angulaire du système de coordonnées	m/s
Θ	L'angle de contact	rad
ϕ_1 ,ϕ_2	Fonctions phase	-
Γ	Tension superficielle	N/m

Table des matières

Introduction générale……..……..…… 1

Chapitre I Étude Bibliographique

Introduction…… 4

I .1 La projection thermique 4

I.1.1 La projection par flamme 4

I.1.1.1 La projection flamme-poudre 5

I.1.1.2 La projection flamme-fil 5

I.1.1.3 Projection supersonique par combustion 5

I.1.1.4 Le canon à détonation 6

I.2 La projection par arc électrique 6

I.2.1 La projection arc-fil 6

I.2.2 La projection par plasma d'arc soufflé 6

I.3 Traitement des particules dans le plasma 8

I.3. 1 Injection et co-injection des particules dans le plasma 8

I.4. Interactions plasma-particules 9

I.5. La théorie de l'adhésion 10

I.5.1 Ancrage mécanique 10

I.5.2 Théorie de la diffusion..... 11

I.6. Préparation de surface, rugosité et adhésion 11

I.7 Quantification de l'adhérence des revêtements 12

I.8 Construction d'un dépôt projeté plasma 12

I.9 Détermination des contraintes résiduelles 13

I.9.1 Genèse des contraintes résiduelles..... 13

I.10 Domain d'utilisation……..…..…… 16

I.10.1 Protection contre la corrosion..... 16

I.10.2 Corrosion sèche..... 16

I.10.3 Corrosions humides 17

I.10.4 Protections contre l'usure..... 17

I.10.5 Usure par corrosion..... 17

I.10.6 Usure par adhésion 17

I.10.7 Application aéronautiques..... 18

Conclusion ……..……..…….. 18

Chapitre II Formulation Mathématique

Introduction..... 19

II.1 Modèle simplifié pour les particules 20

II.1.1 Hypothèses 20

II.1.2 Transfert de chaleur 21

II.1.2.1 Fusion 22

II.1.2.2 Evaporation 23

II.2.3 Couplage avec la dynamique de la particule 23

II.3 Interaction particule-structure 25

II.3.1Contrainte et déformation effective 25

a) contrainte effective de Von-Mises..... 25

b) la déformation effective..... 25

II.3.2 Les équations d'équilibre..... 27

Conclusion 28

Chapitre III Modélisation numérique

Introduction ……...…….…… 29

III.1. Résolution numérique 29

III.2 Discrétisation des équations ……...…….…… 29

III.3. Résolution des équations par éléments finis..... 30

III.3.1. Méthodes des éléments finis..... 30

III.3.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis…….…… 31

III.3.2.1. Formulation variation elle forte..... 31

III.3.2.2. Formulation variation elle faible..... 31

III.3.3. Forme généralisée des équations du système et discrétisation 31

III.3.3.1. Terme temporelle..... 32

III.3.3.2. Terme d'advection..... 33

III.3.3.2.1. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)..... 34

III.3.3.2.2. Method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)..... 35

III.3.3.2.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)..... 35

III.3.3.3. Terme de Diffusion..... 36

III.3.3.4. Termes source..... 36

III.4 Interaction entre particule-structure..... 36

Conclusion 37

Chapitre IV Résultats et discussion

Introduction……. 39

IV.1 Ansys…….. 39

IV.1. 1 Les points forts des outils ANSYS sont..... 39

IV.1.2 Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux ……..... 39

IV.1.3 Schéma de logiciel ANSYS ……... 40

IV.2 Matériaux utilisés……... 40

IV.2.1 l'aluminium..... 40

IV.2.2 Propriétés des particules à l'impact..... 40

IV.3 Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue…….. 43

IV.3.1 Identification..... 43

IV.3.2 Oxydation de la surface des substrats métalliques…….. 45

- **Description du domaine d'application ……....…… 45**

Conclusion……...…… 54

Conclusion générale …….. 55

Référence ……. . 57

Introduction Générale

Introduction Générale :

La projection plasma est une solution très efficace pour la protection des surfaces des matériaux contre les contraintes mécaniques, thermiques et chimiques. Ce procédé trouve beaucoup d'applications dans plusieurs industries notamment : aérospatiale, biomédicale, sidérurgie, électronique et métallurgie.

Le principe de ce procédé consiste à injecter des fines particules dans un écoulement de plasma thermique où elles sont alors fondues et projetées à grandes vitesses vers une surface d'un substrat préalablement préparé. La fusion des particules est due à la très haute température existant dans l'écoulement du plasma thermique qui rend possible la fusion des particules ayant des températures de fusion très élevées tel que les matériaux réfractaires et par la suite l'obtention d'un dépôt. La grande vitesse de l'écoulement de plasma thermique procure à des particules injectées une vitesse adéquate pour l'obtention d'un dépôt fortement adhéré au substrat avec une faible porosité.

Le dépôt ainsi obtenu est constitué par l'empilement de particules, qui s'écrasent avec des vitesses qui s'étendent de 100 à 600 $m.s^{-1}$ selon leurs tailles, leurs masses volumiques et les torches plasmas utilises, fondues ou partiellement fondues sur le substrat à couvrir et préalablement préparé à cet effet. La microstructure et les propriétés du dépôt sont fortement liées aux paramètres du substrat (nature, état chimique de la surface ou couche d'oxyde formée : épaisseur, nature, rugosité, température, …) et aux paramètres des particules (taille, vitesse, température, état de fusion à l'impact, …). Ces derniers paramètres sont eux-mêmes fonctions des caractéristiques du jet de plasma (composition, champs de vitesse et température, enthalpie, conductivité thermique, viscosité, …) et des conditions de leur injection (vitesse moyenne d'injection, point d'injection, distribution de taille des particules, …). Il est donc très clair que la maîtrise du procédé de la projection plasma nécessite d'une part à connaitre la génération et le contrôle du plasma thermique. D'autre part, il nécessite aussi la compréhension des aspects thermiques et dynamiques de l'interaction particule-substrat et l'aspect quant à l'obtention d'un dépôt homogène de bonnes qualités.

Ces phénomènes physiques autour du comportement en cas de chute d'une goutte sont encore mal maîtrisés, même si de nombreuses études, expérimentales et numériques, ont amélioré la compréhension de l'écoulement des particules liquides.

V.Nguyen et al [1], ont étudié la solidification d'une goutte de liquide sur une paroi verticale est un problème typique de transfert de chaleur à changement de phase qui existe largement dans les situations naturelles et d'ingénierie ; Leurs résultats numériques montrent que la pointe conique au sommet de la goutte solidifiée est toujours disponible avec la présence d'une expansion de volume.

Z. Hanene et al [2], ont fait Des recherches numériques sur des gouttes de tensioactif non miscibles se répandant sur des substrats liquides minces ont été effectuées, ces résultats du modèle CFD concordent remarquablement bien avec les mesures des résultats expérimentaux publiés précédemment.

A. Franci et al [3], ont présenté 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 ; Ce travail se concentre sur cet aspect spécifique de la NSA. En particulier, il vise à montrer que la méthode proposée à la capacité de reproduire non seulement l'écoulement et la relocalisation du corium dans la cuve sous pression du réacteur, mais également la défaillance structurelle des internes du réacteur nucléaire. En revanche, d'autres phénomènes survenant au cours d'une NSA, comme les réactions chimiques et radioactives ou la re-solidification du corium, sont considérés hors du cadre de ce travail.

De plus, une simulation numérique et des expériences ont été réalisées par J. Delong et al [4], 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 ; Les résultats numériques sont cohérents avec ceux de l'expérience. Cette étude révèle le mécanisme de formation des éclaboussures d'impact, de propagation et de solidification des gouttelettes dans les rainures texturées.

Une autre étude sur l'interaction entre une goutte de liquide impactant et une projection statique axisymétrique générée sur un solide avant l'impact L.Gangtao et al [5], ont montré que l'augmentation du nombre de Weber diminue légèrement la propagation des ondes est discutée concernant les effets du nombre de Weber et la viscosité du fluide, dont le but est de fournir une méthode appropriée pour prédire le diamètre d'onde.

Une autre vue par une nouvelle méthode de Boltzmann en réseau 3D (LBM) est proposée pour simuler une gouttelette fondue impactant adjacente à la surface froide après son impact sur la surface W. Xiong et al [6]. Où la présence de l’air emprisonné crée une résistance thermique entre la goutte et le substrat ; Il est démontré que la vitesse sans glissement de l'air sur la surface solide empêche l'air d'être complètement expulsé, et l'espace d'air entre la gouttelette et le substrat est comprimé par la gouttelette qui tombe.

Cependant, une étude d’une méthode numérique, basée sur l'hydrodynamique des particules lisses (SPH), est utilisée pour simuler l'impact d'un train de gouttelettes sur une paroi chauffée à différentes fréquences d'impact K. Subedi et al [7]; Dans ce travail, des simulations ont été menées pour des gouttes de n-heptane à différentes fréquences et diamètres d'impact. Ont constaté que le *K* le paramètre fournit une meilleure prédiction des résultats d'impact et l'effet de la fréquence

d'impact est considéré comme la discontinuité cinématique entre les lamelles d'étalement, la formation du film et la rapidité de l'impact des gouttes .Néanmoins, une nouvelle méthode d'évaluation de la sensibilité à l'impact est établie en utilisant la relation entre l'énergie cinétique d'entrée et l'énergie de sortie due à la déformation D. Hong-zheng et al [8] **;** Les résultats simulés montrent que l'échauffement par frottement des fissures de cisaillement est le mécanisme d'allumage dominant.

Par ailleurs, une validation d'un algorithme de couplage d'interaction fluide-structure (FSI) récemment développé pour simuler numériquement la dynamique d'une valve cardiaque mécanique à bile flet aortique (BMHV) est effectuée par S. AnnerelaT et al [9] **;**les résultats sont comparés, révélant une grande similitude dans le mouvement des feuillets et les champs d'écoulement entre la simulation numérique et le test expérimental. Outre, des simulations numériques d'impacts de gouttelettes de céramique sur un substrat et de leur solidification C. Le Bot et al [10] ; Les gouttelettes ont impacté sur le substrat à grande vitesse et se sont solidifié es en peu de temps. Les interactions entre eux ont créé une fine couche.

Par conséquent, dans ce travail on propose de simuler numériquement par la méthode FSI, l'écrasement d'une particule d'alumine 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 parties.

- ✓ La première partie, est concernée à un rappel bibliographique sur la projection thermique.
- ✓ La deuxième partie, est dédiée à la présentation des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié.
- ✓ La troisième partie, est dédiée à la présentation de la résolution numérique des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié en spécifiant la méthode de discrétisation ainsi que la méthode de volume de fluide (VOF).
- ✓ La quatrième et la dernière partie 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 la couche d'oxyde sur l'étalement et solidification d'une gouttelette en aluminium 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 : Étude bibliographique

Introduction

La projection plasma fait partie de la famille des techniques de projection thermique, un groupe de procédés dans lesquels des matériaux métalliques et non métalliques, finement divisés, sont déposés fondus ou semi fondus sur un substrat préalablement préparé [11,12]. Dans ces procédés les particules du matériau d'apport sont fondues ou portées à l'état plastique sous l'effet d'une source de chaleur, accélérées par l'écoulement avant de s'écraser sur la surface à recouvrir sur laquelle elles se solidifient [13]. La projection thermique par flamme est née au début du vingtième siècle lorsque Dr. Schoop (1909) a proposé cette technique [14]. Elle se limitait initialement aux matériaux à bas point de fusion comme l'étain et le plomb puis elle a été étendue aux aciers et matériaux réfractaires.

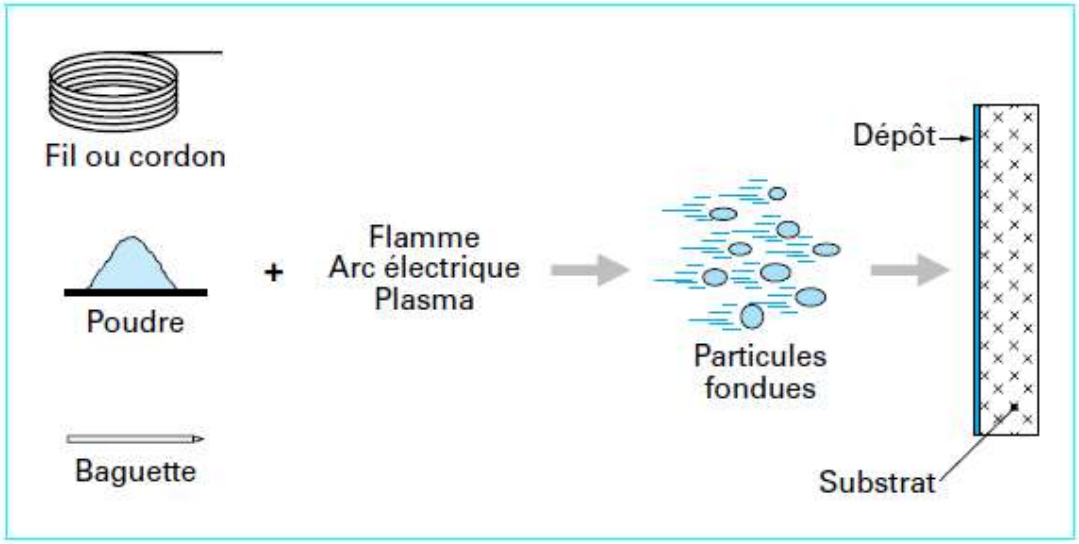


Figure 1. 1 Principe Fondamental De La Projection Thermique [13]

On distingue deux familles de projection thermique selon la source de chaleur employée : la flamme de combustion ou l'arc électrique.

I.1La projection thermique

I.1.1 La projection par flamme

Dans ce type de projection thermique, une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre soit sous forme de fil, de tige ou de cordon (pour les céramiques dans ces deux derniers cas). Dans le premier cas, la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme alors que dans le second, il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme. Les matériaux déposés par cette technique sont usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion.

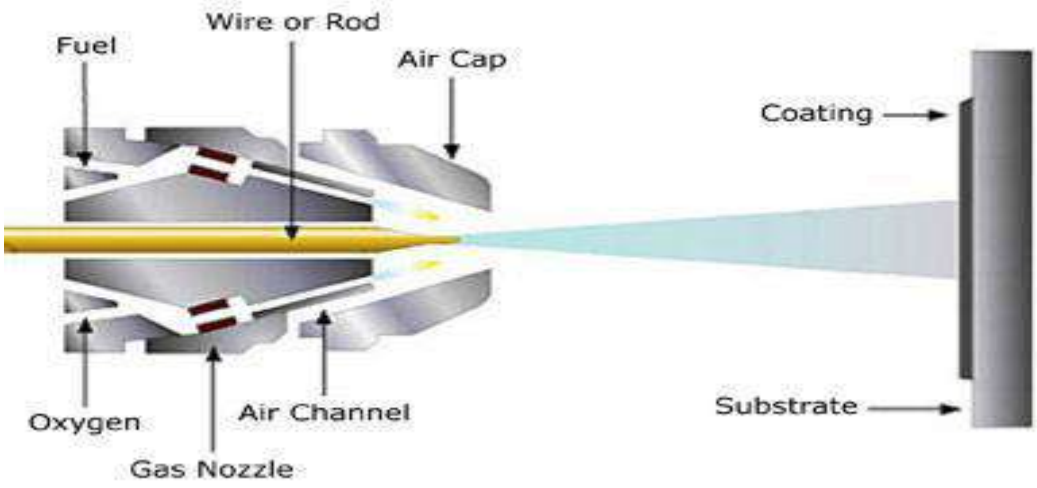


Figure I. 2 Schéma d'un Système du Procédé Projection Par Flamme [13].

I.1.1.1 La projection flamme-poudre

Le matériau à projeter est introduit sous forme de poudre dans une flamme oxygène gaz combustible, les particules sont accélérées grâce au gaz porteur ou à une injection d'air. Les dépôts réalisés présentent une faible adhérence (de 20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %), ceci est essentiellement due aux faibles vitesses d'impact des particules (de l'ordre de 30 $m.s^{-1}$)

I.1.1.2 La projection flamme-fil

Les matériaux d'apport sont introduits sous forme de fil pour les matériaux ductiles ou de cordon ou baguette pour les matériaux céramiques. La flamme sert uniquement à fondre l'extrémité du fil ou cordon. L'entrainement des matériaux fondus vers le substrat est assuré par un jet d'air comprimé.

I.1.1.3 Projection supersonique par combustion

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 $m.s^{-1}$) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée (0,5 à 1 MPa). La chambre de combustion est refroidie et les gaz s'évacuent par une tuyère convergente-divergente suivie d'un fût de quelques dizaines de centimètres destiné à limiter l'entraînement de l'air ambiant. La poudre est injectée dans la flamme, à l'aide d'un gaz neutre porteur, soit en amont (distribution à une pression supérieure à celle de la chambre de combustion) soit en aval (distribution au voisinage de la pression atmosphérique). On distingue deux procédés :

• le procédé HVOF : High Vélocité Oxyda-fuel Flamme, il utilise la Combustion à l'oxygène d'un carburant gazeux tel que : propane, propylène, tétère, méthane ou l'hydrogène ou liquide généralement du kérosène

• le procédé HVAF : High Vélocité Air-fuel Flamme, la combustion est Assurée par un mélange kérosène-air comprimé.

Dans les deux cas, les vitesses des particules sont comprises entre 300 et 600 $m.s^{-1}$ ce qui permet un bon écrasement des particules dans un état plastique.

I.1.1.4 Le canon à détonation

Le matériau d'apport, sous forme de poudre, et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits pratiquement en même temps dans un tube (tube de détonation) fermé à une extrémité. Grâce à une étincelle le mélange de gaz explose créant une onde de choc maintenue par la combustion. L'évacuation du gaz brulé, l'introduction du gaz explosif frais ne permet de renouveler l'explosion que jusqu'à 8 fois par seconde. Les particules de poudres sont ainsi chauffées et éjectées à une grande vitesse (jusqu'à 1200 $m.s^{-1}$) par l'onde de choc créée qui se déplace à des vitesses pouvant atteindre 2900 $m.s^{-1}$. Les dépôts obtenus sont compacts (porosité inférieure à 1 %), de bonne adhérence (généralement supérieure à 80 MPa) et de faible rugosité (Ra = ± 3 µm). Les taux de dépôt horaires sont compris entre 3 et 5 $kg.h^{-1}$ et l'épaisseur de dépôt est généralement inférieure à 0,2 mm.

Ce procédé présente des contraintes aux niveaux des installations (dimensions, bruit de plus de 140 dB, …), ce qui réserve son utilisation à des sites spécialisés.

I.2 La projection par arc électrique

Deux procédés de projection thermique utilisent un arc électrique comme source d'énergie :

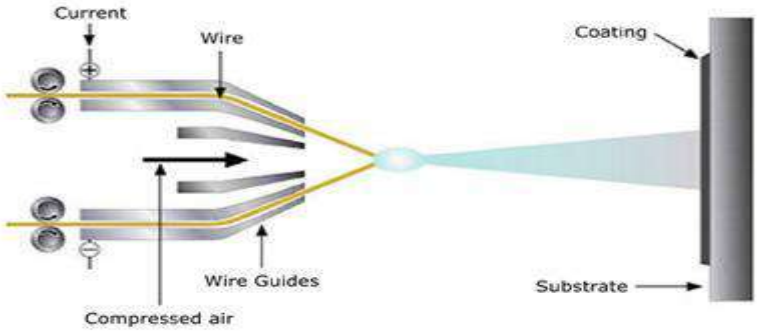


Figure I.3 Schéma D'un Système Du Procédé Projection Par L'arc [13]

I.2.1 La projection arc-fil

Dans ce procédé, deux fils constitués du matériau à projeter servent d'électrodes aux bornes desquelles une tension continue de 25 à 40 V est appliquée, ce qui crée un arc à leurs extrémités. Un gaz d'atomisation soufflé entre les deux fils permet de détacher la partie fondue sous forme de gouttelettes puis de les transporter jusqu'au substrat. Les taux de déposition sont élevés (jusqu'à 20 $kg.h^{-1}$) et les dépôts réalisés sont épais (0,5 mm à 3 mm).

Les matériaux projetés doivent être conducteurs électriques et très filables (zinc, aluminium, cuivre, molybdène et acier), l'utilisation des fils fourrés constitués d'une gaine métallique ductile garnie de poudres de matériaux non-ductiles permet de réaliser des dépôts d'alliages (NiCrAl, NiMoAl, FeCrMn) ou des dépôts métalliques renforcés par des céramiques (carbures, …)

I.2.2 La projection par plasma d'arc soufflé

Dans ce procédé, la source de chaleur est un arc électrique alimenté en courant continu qui éclate entre une anode et une cathode, créant ainsi un plasma, généralement initié par une décharge haute tension (7000-8000 V) et haute fréquence (quelques MHz). Une partie du flux du gaz plasmagène est portée à haute température (au-delà de 8000 K, la majorité des gaz plasmagènes est conductrice électriquement) et est contractée dans la tuyère anode. En aval du pied d'arc et en sortie de tuyère, un jet de plasma de recombinaison est généré dont la vitesse, selon les conditions de tir et le diamètre interne de la tuyère, varie entre 1000 et 2500 $m.s^{-1}$, vitesses subsoniques à ces températures. Au sein de ce jet plasma est injecté (généralement perpendiculairement au jet) le matériau d'apport sous forme d'une poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules fondues ou semi-fondues sont projetées à grande vitesse (de l'ordre de 100 à 300 $m.s^{-1}$) sur le substrat où elles s'écrasent pour constituer le dépôt.

Les gaz plasmagènes utilisés sont, en général, des mélanges binaires ou ternaires constitués d'un gaz primaire de densité massique élevée (argon, azote) et d'un gaz secondaire (hydrogène, hélium) destiné à améliorer le transfert thermique plasma-particule. Le jet plasma est utilisé à l'air ambiant (APS : Air Plasma Spraying), ou en atmosphère contrôlée (argon, azote, …), sinon sous vide partiel (20-50 KPa) ou en surpression (jusqu'à 4 105 Pa). Par rapport aux procédés déjà cités, la projection par plasma d'arc se distingue par :

• un jet de plasma à enthalpie (> 1 $MJ.kg^{-1}$) et température (8000 <T< 14000°C) très élevées ce qui permet de fondre tous les matériaux céramiques et les alliages réfractaires (densité d'énergie de quelques $MW.m^{-3}$) ;

• des vitesses des gaz de l'ordre de 400 à 2500 $m.s^{-1}$ et donc des vitesses de particules relativement élevées 150 à 300 $m.s^{-1}$ pour les torches à cathode tige et 250 à 500 ms^{-1} pour les torches à cathode bouton ;

• des dépôts minces (> 50 μm) ou épais (jusqu'à quelques millimètres) ;

• une large gamme de matériaux projetés.

I.3 Traitement des particules dans le plasma

I.3.1 Injection et Co-injection des particules dans le plasma

Lors de la projection plasma, le matériau projeté sous forme de poudre est injecté localement dans le plasma par un ou plusieurs injecteurs métalliques, le transport des particules étant assuré par un gaz porteur (usuellement de l'argon). Les injecteurs sont, le plus couramment, perpendiculaires à l'axe de la torche [15,16]. Leurs diamètres internes varient entre 1,2 mm et 2 mm afin de limiter la dispersion du jet de poudre. La position de la sortie d'injecteur par rapport à la sortie de tuyère et à l'axe de la torche est un paramètre majeur car elle va définir (avec le débit de gaz porteur) la trajectoire du jet de poudre et donc le traitement thermique des particules par le plasma. Les différentes trajectoires des particules sont essentiellement dues à leur distribution granulométrique et à leurs masses spécifiques (la quantité de mouvement donnée à chaque particule est différente) ainsi qu'aux collisions avec la paroi de l'injecteur et entre elles [16,17]. Cela induit des variations importantes en quantité de mouvement des particules dans le plasma, entraînant des trajectoires divergentes en sortie d'injecteur et donc un traitement thermique également différent. Cette divergence est d'autant plus marquée pour les particules fines, de taille inférieure à 20 microns [16], et légères (alumine par exemple) [17]. Les plasmas étant des fluides très visqueux, le débit du gaz porteur doit être ajusté de façon à adapter la quantité de mouvement des particules en sortie de l'injecteur et ainsi assurer leur pénétration dans le plasma. Ce débit dépend des caractéristiques de la poudre (masse volumique, répartition granulométrique, morphologie des particules), de celles de l'injecteur (diamètre, position, angle avec l'axe de la torche) et de la puissance dissipée du plasma. Afin d'obtenir un rendement de projection maximal, il est nécessaire que la majorité des particules injectées voyage le long de la zone la plus chaude du plasma afin d'être complètement fondue. Le débit de gaz porteur doit être ainsi suffisant pour entraîner les particules au cœur du plasma sans toutefois les faire traverser le dard trop rapidement. Plus les particules injectées sont petites, plus elles doivent être injectées avec une vitesse élevée. L'injection d'une poudre constituée de deux matériaux différents (densité, granulométrie, morphologie, …) peut donner lieu à une ségrégation des particules dans le plasma, induisant des hétérogénéités de composition dans le dépôt [18]. Ce problème peut être résolu par l'utilisation de deux injecteurs séparés (Co-injection). Suivant la position des injecteurs et de la nature du matériau projeté, les particules présenteront différentes trajectoires [19], d'où la nécessité de maîtriser les paramètres d'injection afin d'obtenir la microstructure de dépôt voulue.

I.4. Interactions plasma-particules

Les études numériques et expérimentales effectuées montrent que les interactions entres les particules dans le plasma sont négligeables [15] sauf dans le cas de surcharge ou 'dense landing' [16] 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 [20].

Les transferts de ces quantités, entre le plasma et les particules, contrôlent les trajectoires de ces dernières et leur état de fusion. Engelke [21] a proposé une relation simplifiée (Équation 1-2) liant l'état de la fusion des particules par le jet et les paramètres caractérisant la torche à plasma.

$$\frac{L(\bar{k}.\Delta T)^2}{V_f \mu} > \frac{(Q_l.d)^2}{16\rho} \qquad \text{(I.1)}$$

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 [22,23]. 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 [24,25]: 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 [26]. 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.

I.5. La théorie de l'adhésion

L'adhésion est une notion difficile à définir mais [27] en propose tout de même une définition : « L'adhésion se réfère à l'état dans lequel deux organismes distincts sont maintenus ensemble par un contact interfacial intime comme des forces mécaniques ou un travail transféré jusqu'à l'interface ». Les forces interfaciales peuvent résulter des liaisons de Van Der Waals, des liaisons chimiques ou électrostatiques. Historiquement, l'ancrage mécanique, la diffusion et les théories de réaction d'adsorption à la surface ont fait l'objet de postulats durant de nombreuses années. Ces théories ont récemment été établies pour les mécanismes de liaisons adhésives. Toujours selon [27], il est faux d'attribuer l'adhésion d'un système à un seul mécanisme. En réalité, une combinaison de plusieurs mécanismes à lieu à des échelles parfois différentes. Par exemple, si l'ancrage mécanique agit au niveau microscopique, la diffusion se produit à l'échelle atomique. Le paramètre microscopique déterminant dans l'ancrage mécanique est la surface de contact à l'interface entre les deux parties du système. On parle alors de surface spécifique, c'est-à-dire de surface apparente. La rugosité de la surface est le moyen par lequel l'ancrage mécanique est favorisé [28].

Les mécanismes d'adhésion particule-particule ou particule-substrat font l'objet d'un certain engouement [29] et suscitent encore de multiples interrogations. Les principales hypothèses avancées pour expliquer l'adhésion relèvent des mécanismes mécaniques [30] ou de diffusion à l'état solide ou liquide [31].

I.5.1 Ancrage mécanique

Développée par Mac Bain en 1926, la théorie de l'ancrage mécanique s'explique par la pénétration de la matière dans les cavités ou les porosités de la surface d'un substrat. La matière en contact pénètre dans les rugosités de la surface et forme des liaisons dites mécaniques. Cette contribution, issue de l'ancrage mécanique, est bénéfique pour l'adhérence. En fonction de la morphologie et des dimensions des rugosités, l'ancrage mécanique est différent [32]. Une région de transition plus ou moins épaisse, aussi appelée interface, peut alors se créer. Les liaisons sont généralement plus fortes sur des surfaces rugueuses que sur des surfaces lisses sans aucune rugosité. L'augmentation de l'adhérence de la surface est due à plusieurs facteurs : (1) l'ancrage mécanique, (2) la formation d'une surface propre, (3) la formation d'une surface activée et (4) l'augmentation de la surface de contact. Les changements physiques et les propriétés chimiques de la surface sont responsables de l'augmentation de la force d'adhésion [33]. Cependant, il reste complexe d'attribuer à l'ancrage mécanique la seule responsabilité des liaisons plus élevées qui pourraient s'expliquer par d'autres mécanismes lors de l'augmentation de la surface de contact

(Figure 1-4). D'ailleurs, une étude liant intensité et durabilité des liaisons par l'augmentation de la rugosité de surface, menée par Allen, a montré que la rugosité pouvait abaisser l'adhérence mécanique.

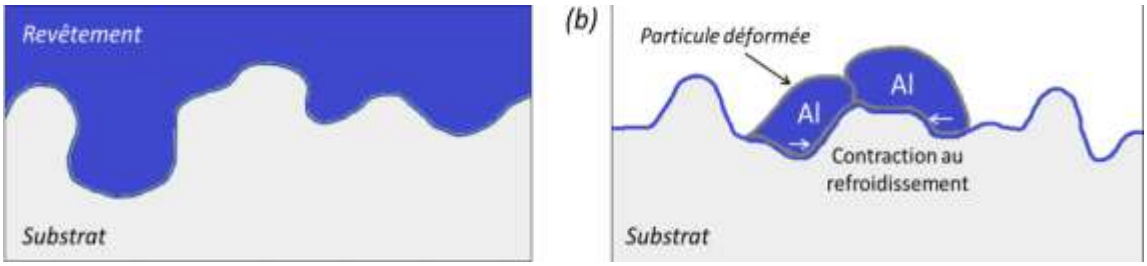


Figure I.4 Illustration de l'accrochage mécanique du fait (a) de la morphologie du substrat et (b) des déformations plastiques de la particule et du substrat

I.5.2 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.

Les travaux de Serge Guetta [31], notamment, ont mis en évidence les phénomènes de diffusion dans le procédé cold spray. En effet, lorsque la particule est en contact avec le substrat, outre l'accrochage mécanique annoncé, une diffusion atomique a lieu. Dans le processus de projection dynamique par gaz froid, les particules arrivent à la surface de la cible à l'état solide. Néanmoins, l'énergie libérée due aux vitesses élevées atteintes par les particules, permet éventuellement une fusion locale à l'impact. Une élévation de la température est alors mesurée [34] et conduit à considérer une diffusion en phase liquide. La présence d'une zone de transition ou d'interface plus ou moins épaisse entre les deux matériaux à assembler est synonyme de diffusion dans le matériau. Fondée sur la loi de Fick, la diffusion peut s'effectuer à l'état solide comme à l'état liquide. Dans les deux cas, le facteur temps joue un rôle et la diffusion est thermodynamiquement activée.

I.6. 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 [28]. 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.7 Quantification de l'adhérence des revêtements

Une centaine d'essais existent et permettent de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. On peut classer les différents dispositifs suivant quatre catégories [35, 32, 36] :

- Les essais de rupture interfaciale : ils mesurent l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure interfaciale. Par exemple le pelage [37] et l'indentation interfaciale [38] ;
- Les méthodes directes : la contrainte d'adhérence appliquée permet la décohésion du revêtement. On y retrouve les essais de traction [39] ou de cisaillement [40] ;
- Les méthodes indirectes : ils induisent un champ de contraintes complexes dans les matériaux et nécessitent la simulation numérique des phénomènes de l'essai pour l'obtention d'une valeur d'adhérence (contrainte ou énergie). Les essais de rayure [41] et de choc laser [42] font partie de ces méthodes ;
- Les méthodes non mécaniques : elles utilisent les ultrasons ou encore les émissions thermo-acoustiques [43] [44].

Choisir le bon essai pour déterminer l'adhérence du revêtement s'avère donc complexe et relève surtout du comportement du matériau à révéler. En effet, certains essais sont quasi statiques quand d'autres sont dynamiques. Il est évident que la réponse du matériau sera différente. Quelques-uns de ces essais sont détaillés par la suite :

I.8 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 morphologie de la lamelle (couramment appelée « splat » en anglais) est déterminante pour la qualité (adhérence et autres propriétés) du dépôt. La manière dont les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe notamment sur la porosité du dépôt et sur la rugosité finale du dépôt. Les lamelles ont des épaisseurs comprises entre 1 et quelques microns et des diamètres variant entre 50 et 100 μm. La structure des dépôts dépend donc des paramètres des particules à l'impact (vitesse, température, taille) mais également des paramètres liés au substrat (nature, rugosité, température de préchauffage, chimie de surface). Cet empilement confère aux dépôts une structure lamellaire particulière anisotrope et Hétérogène de lamelles individuelles. Ce mode de construction génère des défauts : pores, fissurations inter lamellaires (macro fissuration), fissures intra lamellaires (microfissuration), zones de contact

plus ou moins parfaites aux interfaces lamelle-lamelle et lamelle-substrat, rugosité de surface, dont la présence peut être préjudiciables aux propriétés d'usage. Lors de la projection en atmosphère réactive, des phases (oxydes, nitrures, …), créées in situ au cours de la projection, Cette microstructure lamellaire est représentée schématiquement en (Figure 1.5)

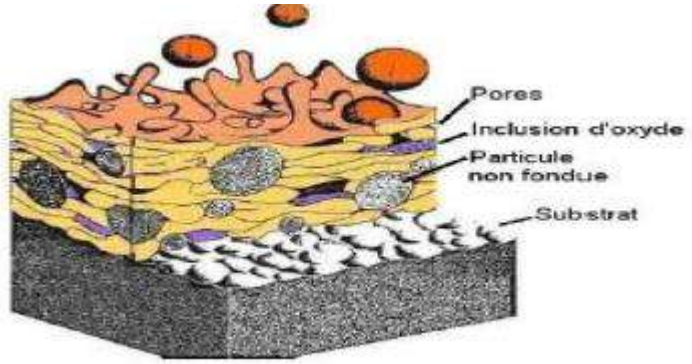


Figure 1.5 Représentation Schématique de L'empilement des Lamelles Lord La Projection Plasma d'après [13]

I.9 Détermination des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont par définition les contraintes qui existent dans une pièce mécanique en l'absence de toute sollicitation extérieure. Leur origine est variée : elles peuvent être le résultat d'un traitement mécanique, thermique ou chimique. A l'échelle de la pièce, leur somme est nulle pour garder l'équilibre mécanique. Dans les revêtements, ces contraintes sont l'une des caractéristiques les plus importantes. Elles peuvent affecter de façon catastrophique la qualité de l'adhérence [45], la résistance à la fissuration, la résistance aux chocs thermiques, la durée de vie sous cyclage thermique, la résistance à l'érosion ...Pour évaluer ces contraintes résiduelles, il existe deux grandes catégories de méthodes expérimentales :

- Les méthodes non destructives
- Les méthodes destructives

I.9.1 Genèse des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles dans les revêtements projetés thermiquement sont principalement le résultat de l'accumulation des contraintes générées par chacune des particules projetées. Elles peuvent se présenter sous forme de contraintes de traction ou de compression. La présence de ces contraintes résiduelles peut influencer les performances d'un revêtement suivant l'application pour laquelle il est destiné.

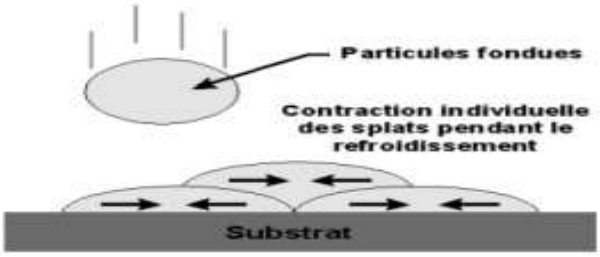


Figure 1.6 Formation des Contraintes Résiduelles de Traction [84]

Les contraintes résiduelles de traction sont le résultat de la contraction individuelle des particules (rétrécissement) pendant le refroidissement (figure 1.6). Ce rétrécissement est d'autant plus apparent quand les particules sont déposées dans un état fondu. On observe plus aisément les contraintes résiduelles quand le revêtement est projeté sur un panneau mince et plat. Un revêtement en traction fléchira le panneau en direction de la torche de projection, et il aura une forme finale concave. Quand ces revêtements sont projetés sur des substrats rigides épais, le substrat ne se fléchit pas et des contraintes élevées sont présentes dans le revêtement et à l'interface substrat/revêtement. Les matériaux avec un coefficient de dilatation thermique élevé se rétréciront davantage que ceux avec un bas coefficient, produisant de ce fait des niveaux plus élevés de contraintes. Les contraintes de traction élevées peuvent également provoquer des fissures si le niveau de contraintes excède la résistance à la traction du revêtement.

Les contraintes résiduelles de compression sont le résultat de l'impact de particules solides ou semi-solides avec le substrat (figure 1.7). Les contraintes de compression sont produites par écrouissage (effet de grenaillage) car les particules non-fondues heurtant la surface déplacent le matériau dans la zone impactée. Des particules plus froides et donc plus solides produiront des niveaux plus élevés de contraintes résiduelles de compression, et un rendement de projection plus faible. Un revêtement avec des contraintes résiduelles compressives fléchira un panneau mince dans la direction opposée à la torche de projection, et le panneau aura une forme finale convexe. Les niveaux élevés de contraintes de compression peuvent également influencer l'adhérence entre le revêtement et le substrat et produire des contraintes de cisaillement à l'interface.

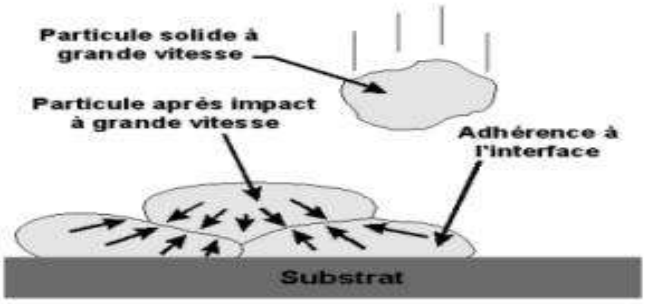


Figure 1.7 Formation Des Contraintes Résiduelles De Compression [84]

Les contraintes résiduelles peuvent être évaluées en utilisant le test d'Almen ("Almen strip test) (figure 1.8). Le test d'Almen est employé pour mesurer le taux d'écrouissage dû au grenaillage. Cet essai est réalisé en prenant une bande mince d'acier à ressort à laquelle on fait subir un grenaillage. Ensuite, on mesure au centre de la bande la flèche résiduelle induite par ce traitement avant de projeter un revêtement d'épaisseur connu, et on remesure la flèche résiduelle. La différence entre les deux mesures quantifie le niveau de contraintes résiduelles. Plus la bande est fléchie plus le niveau de contraintes est élevé. L'inconvénient avec le test d'Almen est qu'il prend en compte la modification de résistance de l'acier due à la production de chaleur pendant la pulvérisation; ainsi la déformation de la bande est dépendante de la quantité de chaleur présente et donc de la température résultante de substrat. Cet essai peut être modifié pour les revêtements projetés thermiquement en utilisant un substrat qui n'est pas affecté par la chaleur, tel qu'un acier inoxydable austénitique ou un Inconel™, ou encore un acier recuit à basse teneur en carbone.

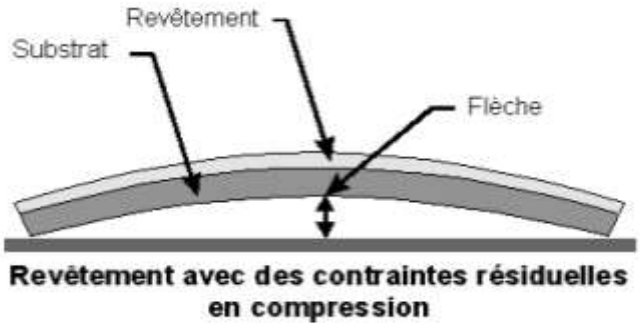


Figure 1.8 Test d'Almen ("Almen strip test") [84]

Les contraintes de cisaillement résultent toujours des autres contraintes résiduelles, qu'elles soient compressives ou de traction. Les contraintes de cisaillement sont des contraintes parallèles à l'interface substrat/revêtement (figure 1.9). Les contraintes de cisaillement peuvent également contribuer au délaminage de l'interface.

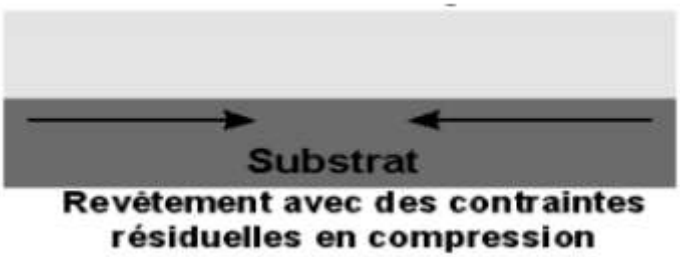


Figure 1.9 Représentation Des Contraintes Résiduelles De Cisaillement [84]

La température du substrat pendant la projection a également un effet sur le taux de contraintes induit à l'interface et dans le revêtement lui-même. Considérons le cas d'un matériau ayant un fort taux de rétrécissement. S'il est déposé sur un substrat froid, quand le revêtement se contracte, il y aura un taux élevé de contraintes car le substrat lui n'a pas changé de dimensions. Si le substrat est préchauffé, alors il se dilate. Le revêtement étant appliqué lui aussi dans un état

dilaté, pendant le refroidissement, substrat et revêtement se contractent en même temps diminuant ainsi les contraintes dans le dépôt.

I.10 Domain d'utilisation

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 secteurs 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 métalliques sur des pièces en polymères.

Projection plasma a débouché sur la sonde à oxygène des pots catalytiques. Uniquement pour cette application, 130 tonnes 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.10.1 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 sèche
- La corrosion humide

I.10.2 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 aluminures 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.10.3 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.10.4Protections 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 solutions 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.10.5 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 mêmes que ceux cités aux paragraphes précédant ; quant aux matériaux très tendres, on peut signaler par exemple le plomb.

I.10.6 Usure par adhésion

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.10.7 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

Cette étude bibliographique sur la formation des dépôts par projection plasma met en évidence leurs applications et leurs axes de développement. 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 et donc nécessite des méthodes plus puissantes, que soit expérimentales ou numériques qui permettrai le suivi d'interface particule-substrat en continu ; pour la bonne compréhension des phénomènes thermique et dynamique couplés lors de la formation des lamelles.

Dans ce travail, nos objectifs seront plus liés à la compréhension et au contrôle des mécanismes intervenant lors de l'étalement par simulation numérique ; nous attacherons à l'étude et à l'optimisation du précédé en étudiant le comportement thermomécanique des particules pendant l'étalement sur le substrat dans différentes conditions. Ces paramètres seront corrélés à la croissance des dépôts et à leurs propriétés.

Chapitre II : Formulation mathématique

Introduction

La simulation d'impact d'une goutte sur un substrat fait appel à la résolution de plusieurs équations qui couplent les aspects thermiques et dynamiques. Dans ce chapitre, on va décrire les équations et les méthodes numériques qui permettent de les résoudre. Des cas simple dont l'expression analytique servent 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 [47].

La majorité des problèmes impliquant une interaction fluide-structure avec un fort couplage entre l'écoulement et le déplacement de la structure sont connus par de grands déplacements des limites du domaine. Les régions proches de ces dernières se déplacent naturellement et sont discrétisées avec une approche lagrangienne. Cependant, l'approche eulérienne conventionnelle avec une référence fixe peut être utilisée pour modéliser les zones fluides situées à l'écart des frontières mobiles.

Dans l'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'énergie sont 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 [48]. Ils demandent cependant un temps de calcul très grand, car les systèmes discrets résultants doivent être résolus de façon implicite.

L'approche lagrangienne 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 poudre.

dans 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,

II.1 Modèle simplifié pour les particules

II.1 Modèle simplifié pour les particules

II.1.1 Hypothèses

Pour représenter les transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement entre le jet plasma et une particule isolée, il est considéré que :

- La particule est sphérique ;
- Les fronts de fusion sont des surfaces avec une tension de surface négligeable ;
- La solidification éventuelle est traitée sans surfusion ;
- La couche limite qui entoure la particule est en équilibre thermodynamique local ;
- L'oxydation des matériaux métalliques n'est pas prise en compte ;
- Le milieu plasma est optiquement mince.

Le transfert thermique et de quantité de mouvement entre plasma et particule [49] dépend essentiellement du temps de séjour de la particule dans le plasma et de la nature des gaz constituants ce dernier (généralement Ar-H_2 ou Ar-He) [50,51]. Une particule injectée dans un plasma est ainsi soumise à trois types d'interactions :

- un transfert de quantité de mouvement plasma/particules qui tend à accélérer les particules [49].
- un transfert de chaleur qui chauffe les particules et les porte jusqu'à l'état liquide ou vapeur [51, 52,53].
- un transfert de masse, s'il y a réaction de surface des particules (oxydation, etc.), ou s'il y a évaporation des particules en vol.

La (Figure II.1) résume les paramètres et les phénomènes à prendre en compte pour étudier et modéliser le comportement d'une particule de matière dans un jet plasma. Dans ce paragraphe, sont étudiés la simulation du traitement thermique de la particule (transfert de chaleur et de masse) et son couplage au traitement dynamique (transfert de quantité de mouvement).

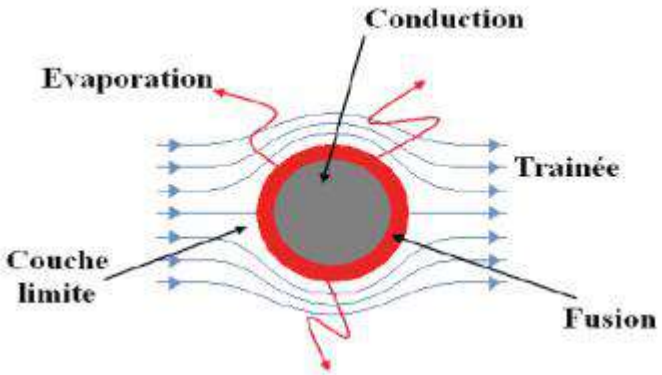


Figure II.1 Aspects Considérés dans le Traitement d'une Particule Injectée dans un Jet Plasma [13]

II.1.2 Transfert de chaleur

Considérons une particule solide de rayon R. La distribution de température dans la sphère peut être décrite par l'équation de continuité du flux d'énergie thermique, adaptée à sa géométrie sphérique [54] :

$$\rho_p C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 K_p \frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad \text{(II.1)}$$

Considérons les conditions aux limites, au centre de la particule (r = 0) la symétrie du domaine étudié permet d'écrire :

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \qquad \text{(II.2)}$$

Tandis qu'en surface (r = R), le transfert de chaleur s'effectue par convection rayonnement [51] :

$$K_p \frac{\partial T}{\partial r} = h.(T_\infty - T_P) + \delta(T_\alpha^4 - T_P^4) \qquad \text{(II.3)}$$

Le transfert de chaleur par rayonnement est effectif entre la particule et le milieu ambiant à la température T_a mais non avec le milieu plasma considéré comme optiquement mince.

h le coefficient de convection est calculé a partir de nombre de Nusselt [55]

$$Nu = \frac{h d_p}{\overline{K_g}} = 2.0 + 0.514 Re^{0.5} \qquad \text{(II.4)}$$

Où $\overline{K_g}$ est la conductivité du plasma évaluée en valeur moyenne intégrale comme proposé par [56] :

$$\overline{K_g}(T) = \frac{1}{T - T_a}\int_{T_a}^{T} K_g(\theta)\, d\theta \qquad \text{(II.5)}$$

II.1.2.1 Fusion

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 [54] :

$$\rho_l C_{Pl} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 K_l \frac{\partial T}{\partial r} \right) \qquad \text{(II.6)}$$

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 [54,57,58,59], utilisée souvent comme référence pour les autres formulations [55,60]. 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*:

$$\vartheta_{Pl} = \frac{\partial R_{Sl}}{\partial t} \qquad \text{(II.7)}$$

Où ϑ_{Pl} vitesse du front de changement de phase solide-liquide ($m.s^{-1}$)

Rsl: position de l'interface solide-liquide (m)

La vitesse du front de changement de phase est donnée par la condition de Stefan (condition de flux thermique) [45] :

$$K_s \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{-} - K_l \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{+} = \rho L_{Pl} \vartheta_{Pl} \qquad \text{(II.8)}$$

En raison de cette dernière condition, le problème de Stefan est non linéaire. Le déplacement de l'interface solide-liquide est fonction du taux de transfert de chaleur au sein des phases solide et liquide. En retour, ce taux dépend de la position et du déplacement de l'interface. De façon pratique, il faut recourir à des méthodes de résolution numériques.

L'dimensionnement des équations fait apparaître le nombre de Stefan défini comme le rapport des enthalpies sensible et de changement d'état mises en jeu dans le processus de fusion et donné par l'équation suivante :

$$St = \frac{C_p(T_f - T_p)}{L_{Pl}} \quad \text{(II.9)}$$

Où Tf : température de fusion LPl : chaleur latente de fusion ($J.kg^{-1}$)

II.1.2.2 Evaporation

Après l'apparition de la phase liquide en surface, la surface de la particule devient le front d'évaporation et le transfert de chaleur avec le milieu plasma est décrit par :

$$K_P \frac{\partial T}{\partial r} = h\,.(T_\infty - T_P) + \sigma(T_a^4 - T_P^4) + \rho_l L_{lv} \vartheta_{lv} \quad \text{(II.10)}$$

Les conditions aux limites à la surface se vaporisant sont obtenues selon l'équation de conservation de masse :

$$\rho_l \vartheta_{lv} = \rho_v . (\vartheta_{lv} - u_v) \quad \text{(II.11)}$$

Oùϑ_{lv}: vitesse du front de changement de phase liquide-vapeur ($m.s^{-1}$)

u_v : vitesse de la vapeur ($m.s^{-1}$)

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, etc,

L'équation régissant le transfert de quantité de mouvement entre une particule sphérique de diamètre d_p et le mélange gazeux, et avec l'effet de la présence du substrat peut être s'exprimé sous la forme suivante [47,60] :

$$\rho_P \frac{dv_P}{dt} = F_D + F_{th} \quad \text{(II.12)}$$

Avec F_{th} la force thermique donné comme suivant.

$$\vec{F}_{th} = -\frac{12\pi.\mu_\infty.\nu_\infty.\frac{d_p}{2}.\frac{C_s}{T_\infty}\overrightarrow{gradT}}{\left(1+6C_m.\lambda/d_p\right)\left(1+2k_\infty/k_p+4C_i.\lambda/d_p\right)}$$

$$F_D = -\frac{1}{2}C_D.\pi\frac{d_P^2}{4}.\rho_\infty.|V_\infty - V_P|.(V_\infty - V_P) \quad \text{(II.13)}$$

En remplaçant F_D par son expression :

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3}{4}\frac{C_D}{d_p}\frac{\overline{\rho_g}}{\rho_P}\left(v_g - v_p\right)\left|v_g - v_p\right| + \frac{F_{th}}{\rho_P} \qquad \text{(II.14)}$$

La condition initiale de la quantité de mouvement est :

À $t=0.$; $v_p=v_{p0}$

v_{p0} est la vitesse axiale initiale avec laquelle la particule est injecté dans le gaz.

$\overline{\rho_g}$ est la masse volumique moyenne est définie par [55] :

$$\overline{\rho_g} = \frac{1}{T_g - T_{PS}}\int_{T_{PS}}^{T_g} \rho_g dt \qquad \text{(II.15)}$$

T_g et T_{PS} sont des températures du gaz et la température de la particule da la couche limite respectivement. Le coefficient de traînée C_D est calculé et présenté par l'équation suivant.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + Re_p \qquad \text{(II.16)}$$

Ou Re_p 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 [61] et les corrélations empiriques suivantes Boulos et Gauvin [62].

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.187Re_p\right) \qquad 0.2 < Re_p < 2 \qquad \text{(II.17)}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.11Re_p^{0.81}\right) \qquad 2 < Re_p < 21 \qquad \text{(II.18)}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.189Re_p^{0.632}\right) \qquad 20 < Re_p < 500 \qquad \text{(II.19)}$$

LEE [21] propose l'utilisation de la relation suivante :

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{\left(1+\sqrt{Re_p}\right)} + 0.4 \qquad \text{(II.20)}$$

En tenant compte de l'effet de discontinuité de Knudsen, le coefficient de traînée devient [51,55] :

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

$C_{D.C}$ est le coefficient de traînée calculé par les formules (II.16),(II.17) ,(II.18)et (II.19) .

Φ le coefficient de correction est calculé [51,47].

$$\Phi = \frac{T_g - T_{Pv}}{T_g - T_{PS}} = \left[1 + 4\left(\frac{2-\theta}{\theta}\right)\left(\frac{T_{PS}}{1+T_{PS}}\right)\frac{Kn^*}{Pr_{PS}}\right]^{-1} \qquad \text{(II.21)}$$

T est le rapport des chaleurs spécifiques du gaz et de la particule.

Pr_{PS} le nombre de Prandtl correspond à la température de la surface.

Kn^* le nombre de Knudsen modifiée $Kn^* = \frac{2Pr_{PS}}{\rho_{PS} v_{PS} d_P} \frac{\overline{K_{g.t}}}{\overline{C_{g.t}}}$

v la vitesse moléculaire ; $v = \left(\frac{8.RT}{\pi.M}\right)^{1/2}$

$\overline{K_{g,t}}$ et $\overline{C_{g,t}}$ Sont les moyennes intégrales entre les températures T_{PS} et T_{PV}

II.3 Interaction particule-structure

II.3.1 Contrainte et déformation effective

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 σe et εe. 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) contrainte effective de Von-Mises

Le tenseur de la contrainte effective σ_e s'écrit :

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(II.22)}$$

Après von Mises, nous faisons correspondre les déviations des contraintes effectives et multiaxiales, sans tenir compte pression hydrostatique $\frac{(\sigma 1+\sigma 2+\sigma 3)}{3}$

$$D_\varepsilon = \begin{bmatrix} \sigma_e - \frac{\sigma_e}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_e}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sigma_e}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_1-\sigma_2-\sigma}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\sigma_1-\sigma_2-\sigma}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2\sigma_1-\sigma_2-\sigma}{3} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.23)}$$

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

$$\boldsymbol{\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \qquad \text{(II.24)}$$

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

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)} \qquad \text{(II.25)}$$

b) la déformation effective

La déformation effective a les trois composantes principales suivantes, qui suivent la loi de Hooke :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}\sigma_e = \varepsilon_e \quad \text{(II.26)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}u\sigma_e = -u\varepsilon_e \quad \text{(II.27)}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E}u\sigma_e = -u\varepsilon_e \quad \text{(II.28)}$$

: Module de Young

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

$$T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_e & 0 & 0 \\ 0 & -u\varepsilon_e & 0 \\ 0 & 0 & -u\varepsilon_e \end{bmatrix} \quad \text{(II.29)}$$

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

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

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

$$\varepsilon_e = \frac{1}{(1+u)\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2} \quad \text{(II.31)}$$

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

$$\varepsilon_e = \frac{1}{(1+u)}\sqrt{\frac{3}{2}(e_1^2+e_2^2+e_3^2)} \quad \text{(II.32)}$$

Sur la base de la loi de Hooke, nous pouvons dériver une corrélation entre la contrainte et la déformation effective de la manière suivante. Tout d'abord, en appliquant l'équation (II.24) pour les contraintes et les déformations dévia toriques :

$$e_i = \frac{1+u}{E}S_i \quad i = 1,2,3 \quad \text{(II.33)}$$

Puis en combinant les équations (II.23), (II.28) et (II.29), on obtient :

$$\sigma_e = E\varepsilon_e \quad \text{(II.34)}$$

II.3.2 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.2). 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 :

$$\left[\left(\boldsymbol{\sigma_x} + \frac{\boldsymbol{\partial \sigma_x}}{\boldsymbol{\partial x}}\boldsymbol{dx}\right) - \boldsymbol{\sigma_x}\right]\boldsymbol{dydz} + \left[\left(\boldsymbol{\tau_{xy}} + \frac{\boldsymbol{\partial \tau_{xy}}}{\boldsymbol{\partial y}}\boldsymbol{dy}\right) - \boldsymbol{\tau_{xy}}\right]\boldsymbol{dzdx} \quad \text{(II.35)}$$

$$+\left[\left(\boldsymbol{\tau_{xz}} + \frac{\boldsymbol{\partial \tau_{zx}}}{\boldsymbol{\partial z}}\boldsymbol{dz}\right) - \boldsymbol{\tau_{zx}}\right]\boldsymbol{dsdy} + \boldsymbol{Xdxdydz} = \boldsymbol{0}$$

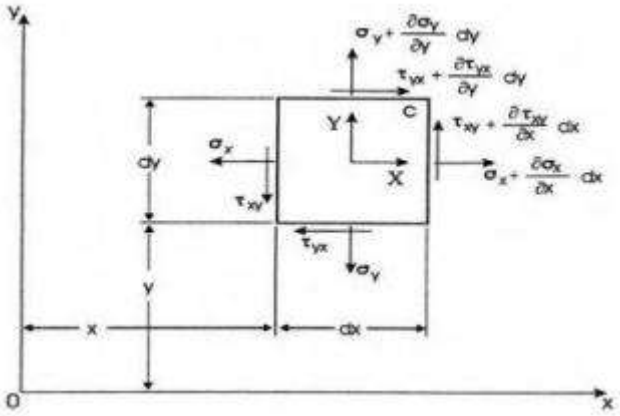


Figure II.2 Les Composantes des Contraintes Agissant Sur un Cube Elémentaire : (Projection Sur Le Plan X.Y)

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

$$\frac{\partial \sigma_X}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \quad \text{(II.36)}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0 \quad \text{(II.37)}$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + Z = 0 \quad \text{(II.38)}$$

Conclusion

Dans de ce chapitre, nous avons 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 en vol 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, évaporation et solidification) et les équations d'interaction particule-substrat Enfin, nous avons présenté le modèle numérique du problème.

Chapitre : III
Modélisation numérique

Introduction

Depuis de nombreuses années, les techniques de simulation connaissent un développement considérable. Les mises au point expérimentales, longues et coûteuses sont progressivement remplacées par des études dans lesquelles les outils de simulation prennent une place de plus en plus importante. Les impératifs industriels de rapidité et de limitation des coûts sont pour l'essentiel responsables de cette évolution. Les approches actuelles concernent l'ensemble des domaines et en particulier la prise en compte des phénomènes dynamique et thermiques.

III.1 Résolution numérique

Lors de l'impact d'une goutte sur un substrat sec, du point de vue de la dynamique (problème isotherme), la compétition entre les différents mécanismes agissant sur la phase d'étalement conduit à des régimes d'étalement très différents, étalement simple, étalement et rebonds ou éclatement (splashing). Quand il s'agit d'introduire le transfert de chaleur avec le substrat et plus particulièrement le processus de solidification, le problème devient d'autant plus complexe que les temps caractéristiques ne sont pas assez différents pour pouvoir découpler les deux processus et le nombre de paramètres augmente significativement. De plus les modèles de solidifications utilisés jusqu'alors sont des modèles à l'équilibre **[63]** ne permettant pas de prendre en compte des conditions de solidifications rapide.

Le modèle numérique proposé et qui sera implémenté dans un code numérique, consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes couplées avec les conditions d'incompressibilité ainsi que la conservation d'énergie thermique, discrétisées au moyen d'une méthode d'élément finis, et un algorithme de volume de fluide (VOF) est utilisé pour suivre la surface libre du fluide ,en un domaine à maillage fixe.

III.2 Discrétisation des équations

Il existe trois grandes familles des méthodes :

- La méthode des différences finies consiste en une discrétisation des opérateurs différentiels sur une grille de pas d'espace fixe à l'aide de développements de Taylor tronqués. Soit par exemple l'équation aux dérivées partielles

$$\boldsymbol{\partial_t u + \alpha \partial_x u = 0}, \quad \boldsymbol{\alpha} > 0 \qquad \text{(III.1)}$$

Un schéma aux différences finies possibles est

$$\frac{\boldsymbol{u_j^{n+1} - u_j^n}}{\boldsymbol{\Delta t}} + \boldsymbol{\alpha} \frac{\boldsymbol{u_j^n - u_{j-1}^n}}{\boldsymbol{\Delta x}} = \boldsymbol{0} \qquad \text{(III.2)}$$

- La méthode des volumes finis est la méthode de choix pour les équations de conservation non linéaires. Voilà quelques propriétés. Soit par exemple le système de lois de conservation en dimension deux d'espace

$$\boldsymbol{\partial_t U + \partial_x f(U) + \partial_y g(u) = 0} \qquad \text{(III.3)}$$

- La méthode des éléments finis s'appuie sur une formulation variationnelle de l'équation aux dérivées partielles. Il n'existe pas de formulation variationnelle pour toute équation aux dérivées partielles. Les méthodes d'Eléments finis ne sont pas bien adaptées à la résolution numérique d'équations non linéaires.

III.3 Résolution des équations par éléments finis

III.3.1 Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode d'interpolation et une méthode vibrationnelle. Etant donné un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0.

a) La méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite à partir d'un nombre fini de réels

b) La méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations. Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en n'importe quel point de l'élément par interpolation.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_h^k$, est de la forme **[64]** :

$$\boldsymbol{\emptyset_h^k(x,y) = \sum_{i=1}^{Nk} \emptyset_i N_i\,(x,y)} \qquad \text{(III.4)}$$

Où :

$\emptyset_i$ Désigne la valeur de la fonction approchée $\emptyset_h$ au point x_i de coordonnées (x_i, y_i),

N_i La fonction d'interpolation associée à x_i,

N_k Le nombre de fonctions utilisées pour l'élément K.

Les coefficients $\emptyset_i$ de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret. Les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie N_h dans lequel on cherche à priori la solution discrète $\emptyset_h$.

Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est utilisée : l'erreur commise est minimisée en remplaçant dans les équations aux dérivées partielles la fonction exacte par la fonction approchée. Pour cela, on projette l'erreur sur un espace de fonction $\emptyset_h$ à préciser.

La méthode de Galerkin est un cas particulier de la méthode des résidus pondérés, l'espace de projection est le même que l'espace d'approximation de la solution du problème, autrement dit $\emptyset_h = N_h$.

III.3.2 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.3.2.1 Formulation variationnelle forte

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s'écrit alors comme suit: Trouver u(x) *u(x)* espace des solutions $U_S$telles que **[65,66]** :

$$\mathcal{L}(\mathbf{u}) - \mathcal{F} = \mathbf{0}\ \forall \mathbf{x} \in \Omega\ \mathbf{B}(\mathbf{u}) = \mathbf{u_0}\ \forall \mathbf{x} \in \Gamma_{\mathbf{u0}} \qquad \textbf{(III.5)}$$

On note que l'espace Us dans lequel nous recherchons la fonction u, doit être défini judicieusement.

III.3.2.2 Formulation variationelle faible

La formulation variationnelle faible peut être obtenue par les étapes suivantes :

1. Approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par $\tilde{u}$tel que **[64,67]** :

$$\tilde{\mathbf{u}} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i}\tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i} \qquad \text{(III.6)}$$

Où $N_i = N_i$ (x, y) désignent les fonctions de forme et$\tilde{u}_i$des valeurs nodales indéterminées.

2. Introduire (III.6) dans (III.5) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathcal{L}(\tilde{\mathbf{u}}) - \mathcal{F} \neq \mathbf{0} \qquad \text{(III.7)}$$

3. Obtenir une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire W tel que

$$\int_{\Omega} \mathbf{W_k}(\mathcal{L}(\tilde{\mathbf{u}}) - \mathcal{F})\mathbf{d\Omega} = \mathbf{0}, \mathbf{k} = \mathbf{1}, \mathbf{2}, .. \mathbf{N} \qquad \text{(III.8)}$$

Où N Nombre d'inconnues indépendants du système (III.5).

En formulation de Galerkine les fonctions tests sont assimilées aux fonctions de forme.

On pose

$$\mathbf{W_k} = \mathbf{N_k} \Longrightarrow \int_{\Omega} \mathbf{N_k}.\mathcal{L}(\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i}\tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i})\mathbf{d\Omega} = \mathbf{0} \qquad \text{(III.9)}$$

On dit que $u \in H_0^1(\Omega)$est une solution faible de (III.8) si :

$$\forall \mathbf{v} \in \mathbf{H_0^1(\Omega)}: \mathbf{a}(\tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f}\ \mathbf{v}\ \mathbf{d\Omega} \qquad \text{(III.10)}$$

a($\tilde{u}$, v) est la forme bilinéaire associée à $\mathcal{L}$Soit Ω un ouvert borné de R^d et $\partial\Omega$ est régulier. On considère alors le problème :

$$\mathbf{Lu} = \mathbf{0}\ \mathbf{sur}\Omega\ \mathbf{et}\ \mathbf{u} = \mathbf{0}\ \mathbf{sur}\ \partial\Omega \qquad \text{(III.11)}$$

II.3.3 Forme généralisée des équations du système et discrétisation

Les équations du système sont écrites sous la forme généralisée suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_{\emptyset}\emptyset) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) + S_{\emptyset} \quad \text{(III.12)}$$

Où :

$\emptyset$: Variable généralisée.

$C_{\emptyset}$: Coefficient d'advection transitoire.

$\Gamma_{\emptyset}$: Coefficient de diffusion.

$S_{\emptyset}$: Terme source.

Le tableau (III.1) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système.

Variable $\emptyset$	Coefficient d'advection $C_{\emptyset}$	Diffusivité $\Gamma_{\emptyset}$	Terme source $S_{\emptyset}$
V_x	1	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial V}{\partial y}\right) - \sigma\nabla\left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right).\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}$
V_y	1	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial V}{\partial y}\right) - \sigma\nabla\left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right).\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}$
T	1	$\frac{K}{\rho C^e}$	$\frac{Q}{\rho C^e}$
ρ	1	0	0

Tableau III.1 Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[68].**

La discrétisation de ces équations permet de convertir les équations aux dérivées partielles en équations algébriques qui sont alors résolues par les méthodes numériques traditionnelles.

Le procédé de discrétisation par EF consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire **[65]**.

$$\left([\mathbf{A_e^{transient}}] + [\mathbf{A_e^{advection}}] + [\mathbf{A_e^{diffusion}}]\right)\{\emptyset_e\} = \{\mathbf{S_e^{\emptyset}}\} \quad \text{(III.13)}$$

Pour les intégrales élémentaires, La méthode Galerkin des résiduels pesés est employé.

III.3.3.1 Terme temporelle

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[65]** :

$$[\mathbf{A_e^{transient}}] = \int \mathbf{W^e}\frac{(\partial \rho c_{\emptyset}\emptyset)^e}{\partial t}\mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.14)}$$

Avec :

W^e : La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme.

Pour le nœud i:

$$\int \mathbf{W_i^e}\frac{(\partial \rho c_{\emptyset}\emptyset)^e}{\partial t}\mathbf{d(vol)} = \int \mathbf{W_i^e}\rho c_{\emptyset}\mathbf{W_j^e}\,\mathbf{d(vol)}\frac{\partial \emptyset_j^e}{\partial t} + \int \mathbf{W_i^e}\frac{\partial \rho c_{\emptyset}\emptyset_j^e}{\partial t}\mathbf{W_j^e}\,\mathbf{d(vol)}\emptyset_j^e \quad \text{(III.15)}$$

Les indices inférieurs i et j indiquent le nombre de nœud. Si la deuxième partie de l'équation (III.14) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme :

$$\mathbf{M_{ij}} = \int \mathbf{W_i^e \rho c_\emptyset W_j^e \, d(vol)} \quad \text{(III.16)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$\mathbf{M_{ij}} = \boldsymbol{\delta_{ij}} \int \mathbf{W_i^e \rho c_\emptyset \, d(vol)} \quad \text{(III.17)}$$

Où :

δ_{ij} =delta de Kronecker (0 si i ≠ j, 1 si i = j)

Il y a deux méthodes d'intégration temporelles : Newmark et (backward difference) différence en arrière.

La méthode d'intégration de temps de Newmark ou, la formulation implicite de base nodale, exprime l'étape de temps courant comme la nième étape de fois et l'expression comporte les résultats précédents d'une étape de temps.

$$\mathbf{(\rho\emptyset)_n} = \mathbf{(\rho\emptyset)_{n-1}} + \mathbf{\Delta t}\left(\boldsymbol{\delta}\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{\mathbf{n}} + (\mathbf{1}-\boldsymbol{\delta})\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{\mathbf{n-1}}\right) \quad \text{(III.18)}$$

Où :

δ : Coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark.

L'équation (III.16) est écrite comme suite :

$$\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{\Delta t\delta}}\mathbf{(\rho\emptyset)_n} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{\Delta t\delta}}\mathbf{(\rho\emptyset)_{n-1}} + \left(\mathbf{1}-\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\delta}}\right)\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{\mathbf{n-1}} \quad \text{(III.19)}$$

Pour la méthode de différence en arrière, l'étape de temps courant est la nième étape de fois et l'expression comporte les deux résultats précédents d'étape de temps.

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\emptyset)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\emptyset)_n}{2\Delta t} \quad \text{(III.20)}$$

Pour la méthode (VOF) l'équation ci-dessus est modifiée lorsque les résultats à une étape précédente de temps sont nécessaires :

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_n}{\Delta t} - \frac{(\rho\emptyset)_{n-1}}{\Delta t} \quad \text{(III.21)}$$

L'arrangement de premier ordre ci-dessus de différence de temps est choisi pour être conformé à l'algorithme courant d'advection de VOF. La nième étape de fois produit une contribution à la diagonale de la matrice élémentaire, alors que les dérivés de l'étape précédente de temps forment des contributions au terme source.

III.3.3.2 Terme d'advection

Il ya trois approches pour la discrétisation du terme d'advection. L'approche dite ligne de courant monotone upwind (MSU), La ligne profilée upwind/Petro-Galerkin (SUPG), et les approches colloquées de Galerkin (COLG).

III.3.3.2.1 Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des lignes caractéristiques. Il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transportée dans un domaine connu de vitesse. Voir Le Schéma III.1: " l'Approche des ligne de courant D'Upwind ".

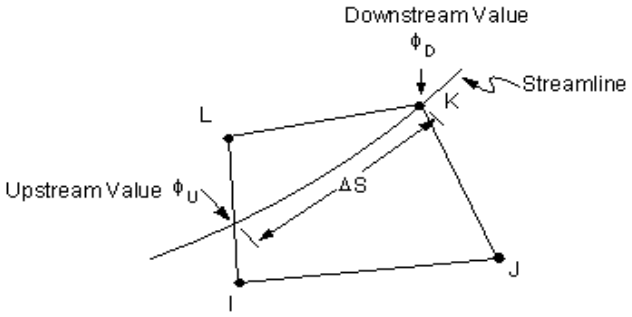


Figure III.1 Approche de ligne de courant d'Upwind **[68].**

Le champ de vitesse lui-même peut être envisagé partout comme ensemble de tangente de lignes profilées aux vecteurs de vitesse. Les limites d'advection peuvent donc être exprimées en termes de vitesses aérodynamiques.

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c'est-à-dire, tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit **[68]** :

$$\frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_x \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_y \emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III.22)}$$

Une fois exprimé le long d'une ligne profilée, et donc constant dans tout l'élément, on peut écrire :

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{ds} \int W^e d(vol) \qquad \text{(III.23)}$$

Cette formulation est faite pour chaque élément, dont chacun aura seulement un nœud qui obtient des contributions de l'intérieur de l'élément. Le dérivé est calculé en utilisant une différence simple :

$$\frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s)}{ds} = \frac{(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_U - (\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_D}{\Delta s} \qquad \text{(III.24)}$$

Où:

D = Indice de la valeur au niveau du nœud aval

U = indice de la valeur prise à l'endroit où la rationalisation dans le nœud sous le vent pénètre dans l'élément.

Δs = la distance du point situé en amont à l'aval du nœud.

La valeur à l'endroit ascendant est inconnue mais peut être exprimée en termes de valeurs nodales inconnues qu'il est entre l'amont et l'aval. Voir le schéma (III.1).

Le processus consiste à cycler par tous pour l'élément et identifier les nœuds arrière. Le calcul effectué est basé sur les vitesses, pour voir d'où elle est venue la ligne profilée dans le nœud. Des facteurs pesants sont calculés, basé sur la proximité de l'endroit d'upwind aux nœuds voisins.

III.3.3.2.2 Method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection **[68]** :

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}}\int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e \partial W^e}}{\partial x} + \frac{\mathbf{V_y^e \partial W^e}}{\partial y}\right\}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}}{\partial x} + \frac{\mathbf{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}}{\partial y}\right\}\mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.25)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

h = longueur d'élément le long de la direction d'advection

$$U_{max} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

$$Z = \begin{cases} 1 & \text{si o} \leq \text{pe} < 3 \\ \text{pe} & \\ \overline{3} & \text{si pe} \leq 3 \end{cases}$$

$$\text{pe} = \frac{\rho c_\emptyset U_{max} h}{2\Gamma_\phi} = \text{nombre de peclet}$$

Il est clair que pour l'approche de SUPG la maille est raffinée, les termes de perturbation tend à zéro et la formulation de Galerkin approche à l'exactitude du second degré.et donc le terme de perturbation fournit la stabilité nécessaire qui est absente dans la discrétisation pure de Galerkin.

III.3.3.2.3 Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

L'approche de COLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué. Dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesses, (les vitesses nodales élément-élément-based) qui sont faites pour satisfaire l'équation

de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement **[68]**.

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}}\int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{V_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial W^e}{\partial y}\right\}\left\{\frac{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III.26)}$$

Dans cette approche, l'équation de pression est dérivée à partir des vitesses nodales (élément- element-based), et elle est généralement asymétrique. La conservation exacte soit préservée même sur les mailles brutes.

III.3.3.3 Terme de Diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au-dessus du domaine de problème après la multiplication par la fonction pesante **[68]**.

$$\mathbf{Diffusion\ contribution} = \int \mathbf{W^e}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\mathbf{d(vol)} + \int \mathbf{W^e}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right)\mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.27)}$$

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée **[68]** :

$$\int \mathbf{W^e}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\mathbf{d(vol)} = \int \frac{\partial \mathbf{W^e}}{\partial x}\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.28)}$$

Une fois que la dérivé du φ est remplacé par les valeurs nodales et les dérivés de peser fonctionnent, les valeurs nodales seront enlevées des intégrales

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = \mathbf{W_x^e}\emptyset \quad \text{(III.29)}$$

$$\mathbf{W_x^e} = \frac{\partial \mathbf{W^e}}{\partial x} \quad \text{(III.30)}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[\mathbf{A_e^{Diffusion}}\right] = \int(\mathbf{W_x^e}\Gamma_\emptyset \mathbf{W_x^e} + \mathbf{W_x^e}\Gamma_\emptyset \mathbf{W_x^e})\mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.31)}$$

III.3.3.4 Termes source

L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[68]**:

$$S_\emptyset^e = \int W^e S_\emptyset d(vol) \quad \text{(III.32)}$$

III.4 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 :

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [K_s]\{U\} = \{F_s\} + [R]\{P\} \quad \text{(III.33)}$$

$$[M_f]\{\ddot{P}\} + [K_f]\{P\} = \{F_f\} - \rho_0[R]^T\{\ddot{U}\} \quad \text{(III.34)}$$

$[R]$ 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.

Conclusion

Dans ce chapitre les méthodes numériques utilisées pour le traitement des problèmes thermiques ont été exposées, l'équation de transport par la méthode des éléments finis a été discrétisée pour la mettre sous la forme algébrique.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons 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 et al [69] d'autre part, la simulation numérique d'impact de goutte d'aluminium sur un substrat d'acier oxydé (couche d'oxyde d'acier (Fe_2O_3), en variant l'épaisseur de la couche d'oxyde. Les résultats faits à partir d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel « le code 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. 1Les points forts d'outils ANSYS sont

- 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 sous 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 Mechanical 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.1.3Schéma de logiciel ANSYS

Le code de calcul ANSYS basé sur la méthode des éléments finis qui contient les étapes caractéristique ou blocs fonctionnels décrits sur la figure IV.1

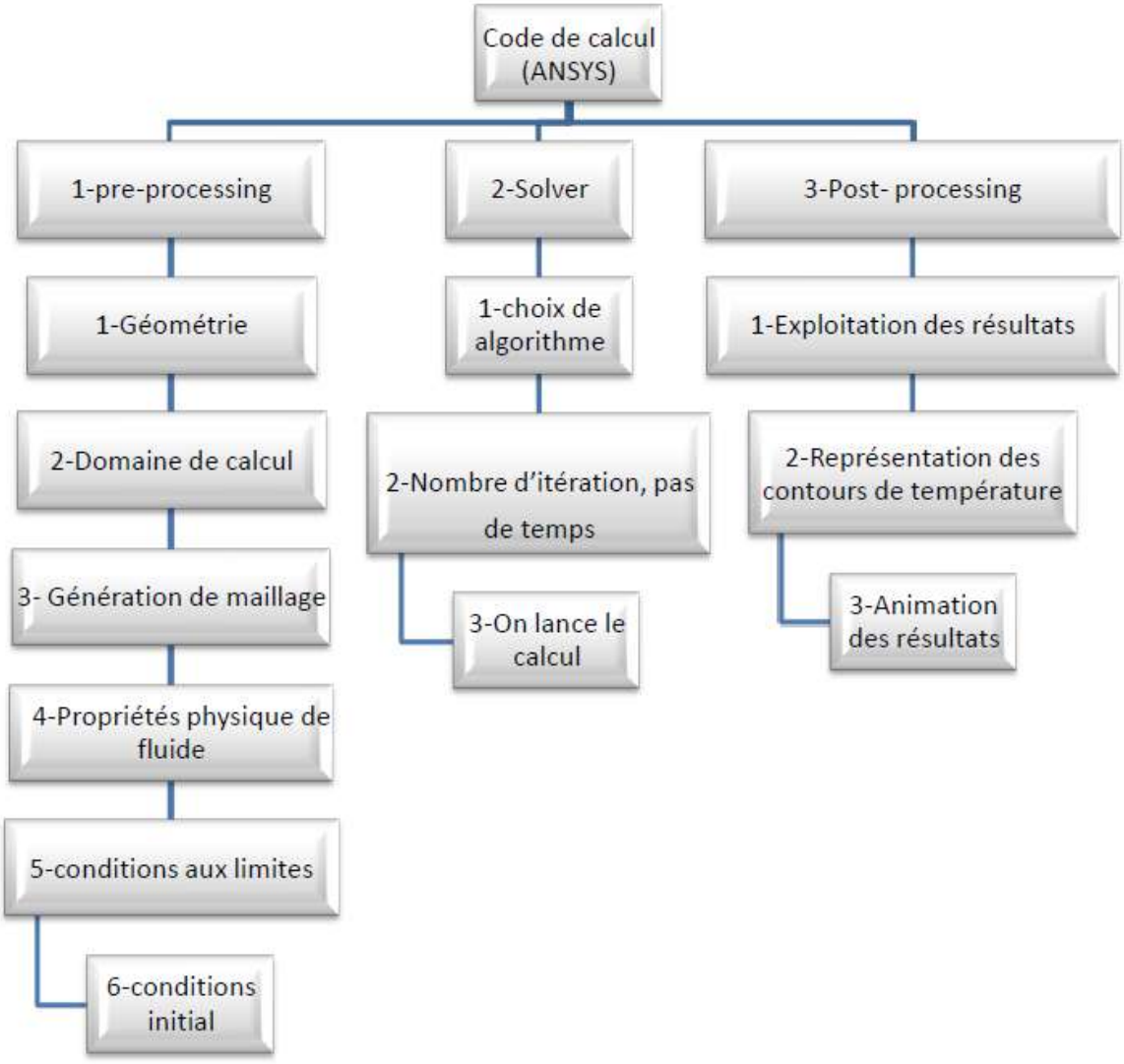


Figure IV.1 Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.2Matériaux utilisés

Dans cette étude numérique on est intéressé à des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat métallique (acier d'outil H13) le choix de l'aluminium a été orienté par des nombreuses études déjà menées, telle que les travaux expérimentaux qui ont

consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'aluminium sur substrat en acier, et qui sera l'objet d'identification du présent 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}mm³/N.m, à l'abrasion par une bille de sic de 6mmde diamètre et sous une charge de 5N à température ambiante, ce taux d'usure augmenté 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 à côté 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 applications 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.2.2Propriétés des particules à l'impact

Pour l'alumine **:**

$$\rho = 2.79\times10^3[1 - 4.22\times10^{-5}(T-T_f)] \quad \text{(IV.1)}$$

$$\mu = 2.87\times10^{-9}\exp(2{,}05.10^4 / T)$$

***Pour l'acier* :**

$$\rho = 0.9246\times10_4\text{-}1.481\times T+1.425(T/100)^2 \quad \text{(IV.2)}$$

$$\mu = 0.3162\times10^{-3}\exp(5.004\times10^3/T)$$

Les équations (IV.1) et (IV.2) concernent, plus exactement, le fer pur mais ont été adoptées pour l'acier 316L compte tenu des valeurs voisines de densité et viscosité entre le fer et l'acier 316L liquide. Ainsi que pour le calcul numérique on a utilisé les propriétés thermo-physiques représentées sur le tableau IV.1

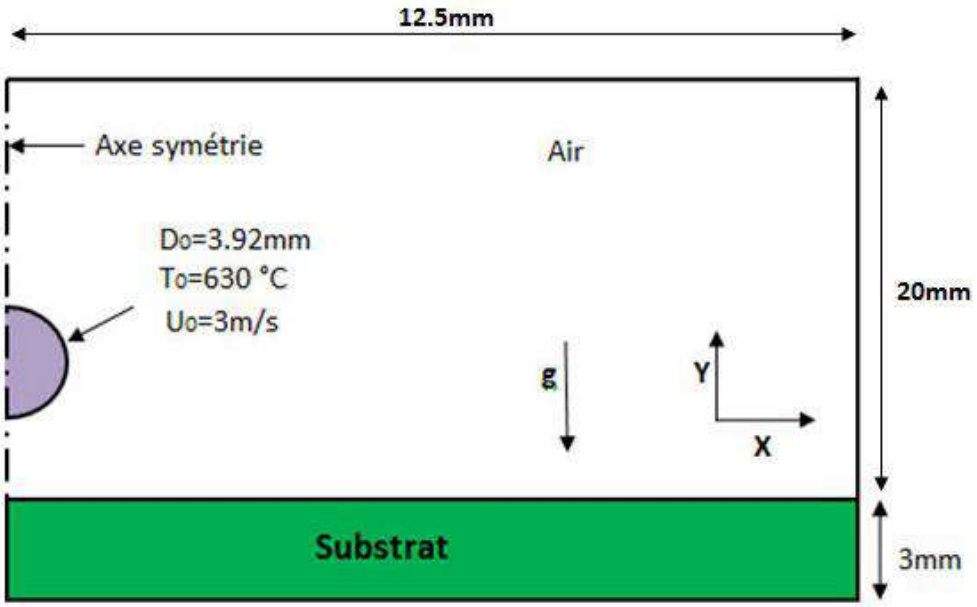


Figure IV.2 Géométries de Substrat et Particules D'aluminium.

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

Propriétés	**Particule:Alumine**	**Substrat:Acier à outil H13**	**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)
Conductivitéthermique	70	26	2.9	(W/m K)
Chaleurspécifique liquide	1000		670	(J/Kg K)

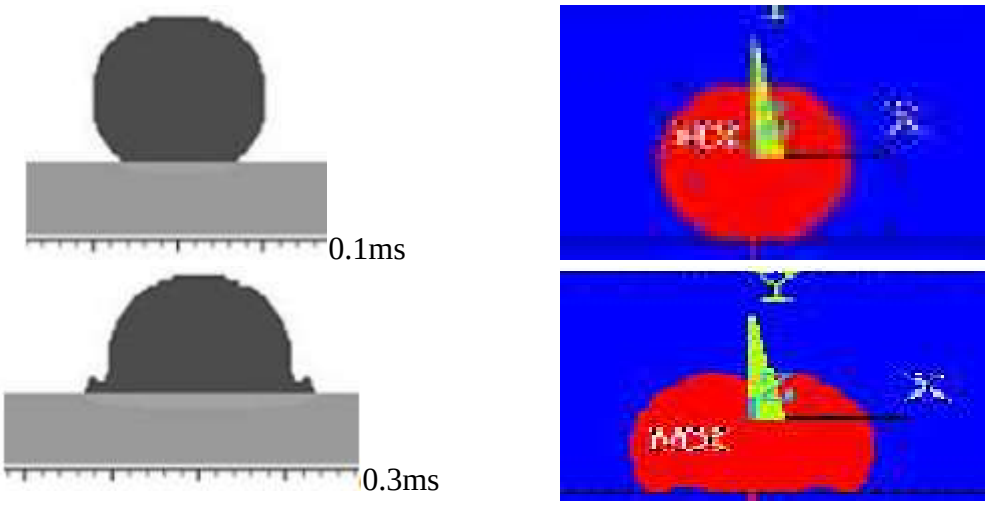
Conductivité thermique solide	°C 400 144 500 147 630 70			(W/m K)
Chaleur spécifique	°C 100 400 300 500 400 800 570 1050 580 1038	°C 20 460 200 502 500 550		(J/Kg K)

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

IV.3.1 Identification

Un exemple de validation proposé par M. Xue et al. [69] a été considérée ici pour illustrer les résultats de la simulation de contact/impact utilisant la technique FSI décrite ci-dessus. La validation concerne une particule d'alliage d'aluminium 380 de diamètre 3.92mm et température initiale 630°C à une vitesse de 3m/s, impactant sur un substrat plat en acier à outils H13 (de 12.5 mm sur 3mm) initialement à une température de 200°C Figure (IV.3).

On peut constater que le comportement dynamique de la gouttelette dans l'ensemble donne un bon accord à celui des images d'expérimentales, d'où après le premier contact 0.1ms, la gouttelette se propage symétriquement par rapport au point d'impact. Cependant, la forme convexe abaisse la pente dans le temps en glissant lentement sur le substrat jusqu'àl'étalement totale, il faut noter que le liquide suit la topographie de la surface. Ainsi le liquide qui s'écoule perpendiculairement à la surface est projeté verticalement du fait de son inertie.



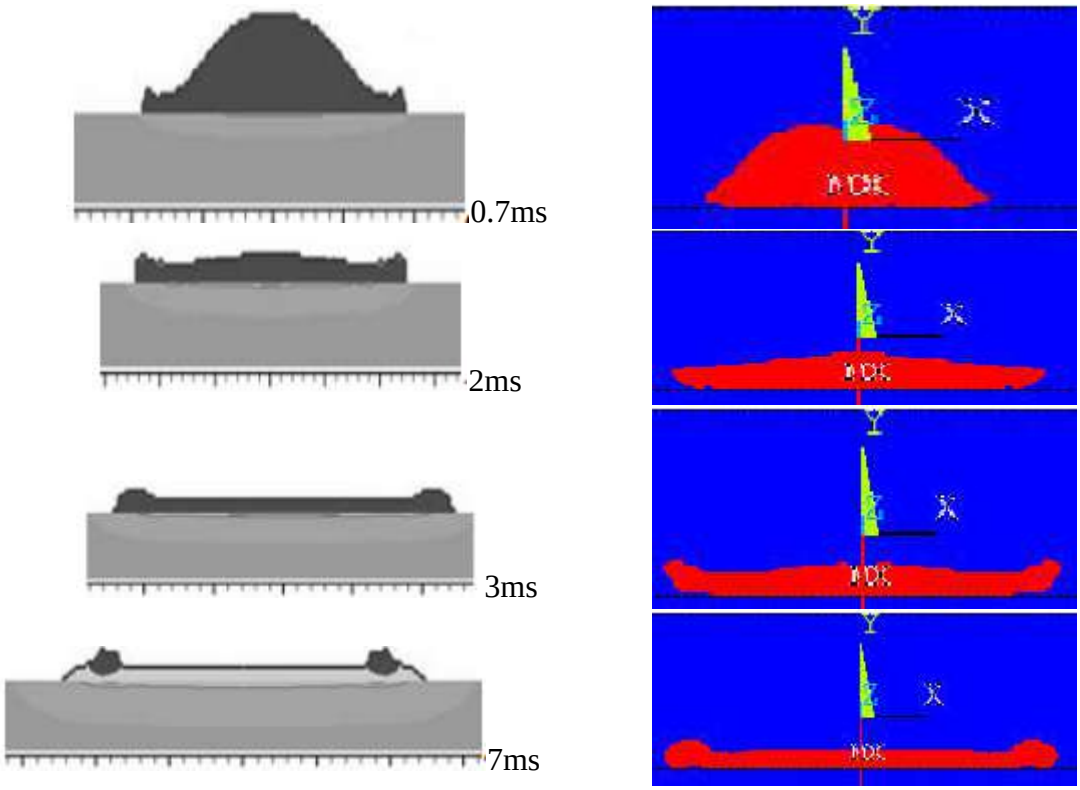


Figure IV.3 L'impact d'une particule en Aluminium d'un diamètre de 3.92mm Initialement a une Température de 630°C et une vitesse de 3m/s sur Substrat en Acier d'outil initialement a 200°C

La figure IV.4, représentation comparative des facteurs d'étalement pendant Le temps de la particule pour les deux cas. 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 3.4 pour les deux cas). Les résultats du modèle présenté sont très proches des autres auteurs.

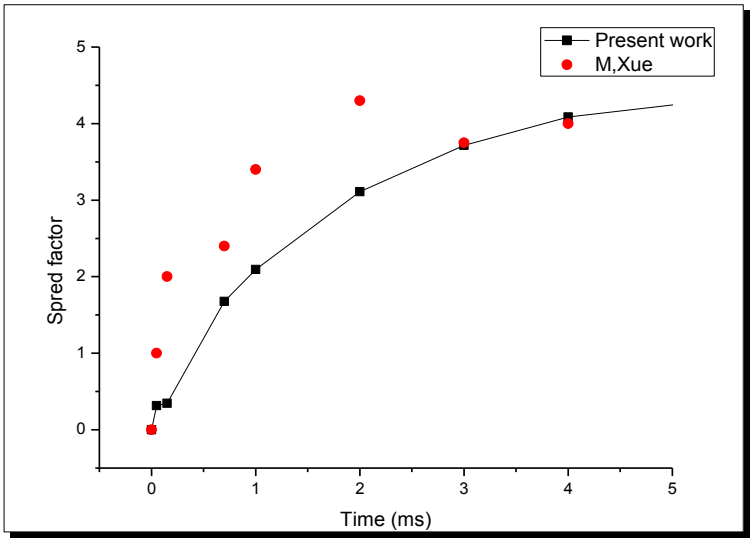


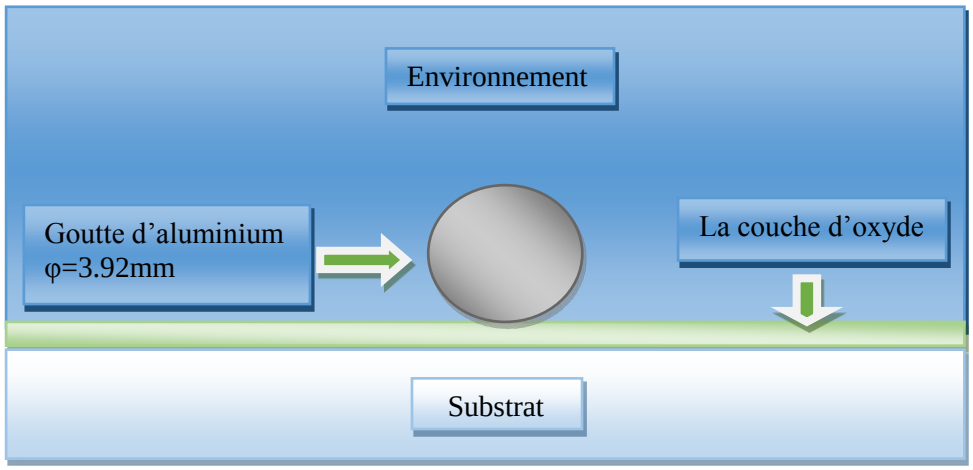
Figure IV.4 Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions.

IV.3.2 Oxydation de la surface des substrats métalliques

La formation d'une couche d'oxyde, composée principalement de Fe_2O_3 et à la surface du substrat d'acier été prise en compte dans cette étude de deux façons différentes en modifiant l'épaisseur de la couche.

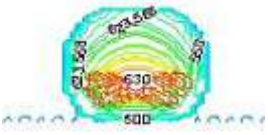
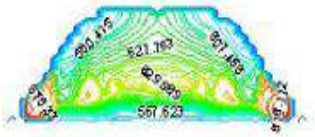
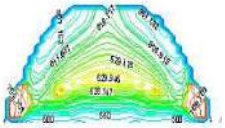
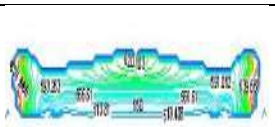
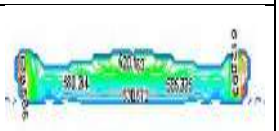
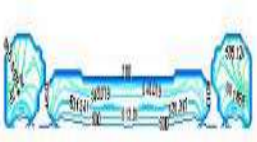
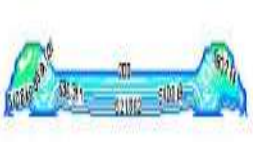
- **Description du domaine d'application**

Dans cette étude on propose de simuler et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact de particule d'aluminium déposée sur un substrat d'acier en présence de couche d'oxyde, pour quatre cas présentés sur la figure (IV.5)



Le tableau IV.2 représente la distribution de température pendant l'impact de la gouttelette où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les "doigts" à la périphérie de lamelle formé ont solidifié en retard et ont arrangé sur des aspérités approximatives de substrat. Ceci est dû au flux radial et à la séparation à grande vitesse du principal bord de lamelle (splat) qui a réparti au-dessus des aspérités de substrat. Les résultats numériques ont également indiqué que le centre d'une lamelle (splat) typiquement s'est bien conformé à la topographie fondamentale de substrat due à la pression de stagnation et de taux de cisaillement de l'écoulement qui a dirigé en pente rapide vers la surface encourageant le fluide pour couler dans les cavités extérieures.

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

	Sans couche d'oxyde	0.1	0.3	0.5
0.05				
0.15				
0.7				
3				
8				

La figure IV.6 représente une comparaison entre les facteurs d'étalement des quatre cas. L'étalement et la forme de la goutte sont semblables au cours de l'impact. À l'instant t = 0.1ms, la goutte s'étale encore plus rapidement et commence à prendre la forme d'une lamelle, après l'instant t=7ms la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement finale. On peut voir clairement l'effet des forces visqueuse qui sont corriger après chaque pas de temps sous l'effet de transfert de chaleur dans la particule et la solidification, avec un front transversal.

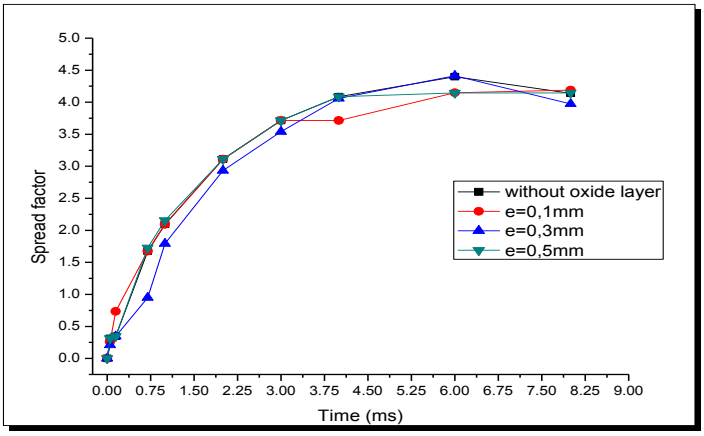


Figure IV.6 Comparaison entre les facteurs d'impact pour les quatre cas.

D'autre part, de mettre en évidence l'existence d'augmentation de température à la surface du l'acier au contact de la gouttelette, dans il est claire l'apparaissions des zones de bonne et de mauvaise contacte à l'interface particule/substrat figure IV.7. Donc on peut dire que, aux tous premiers instants suivants le premier contact de la goutte avec la cible, la température du substrat au point d'impact augmente rapidement et la résistance thermique diminue. 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.

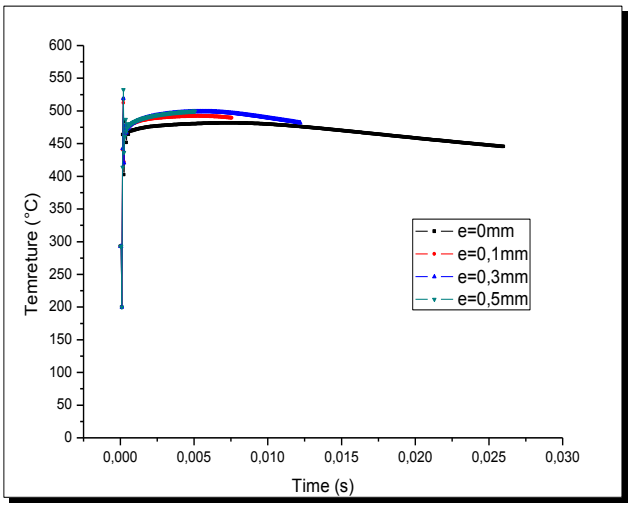
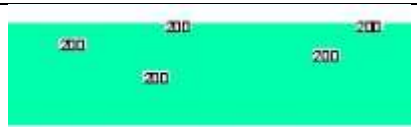
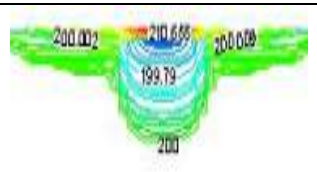
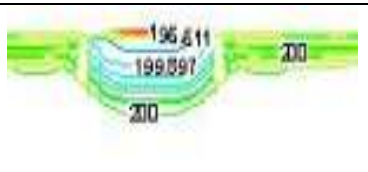
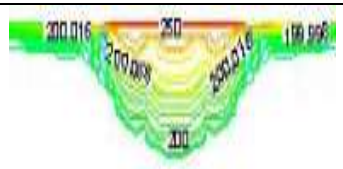
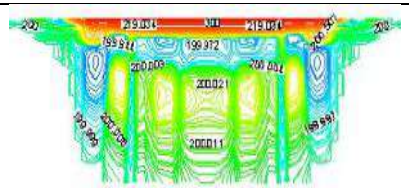
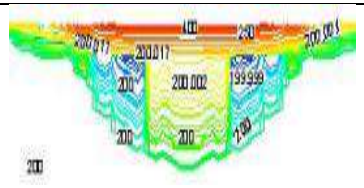
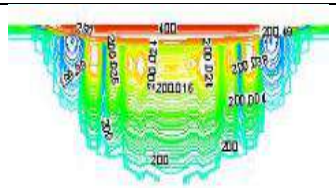
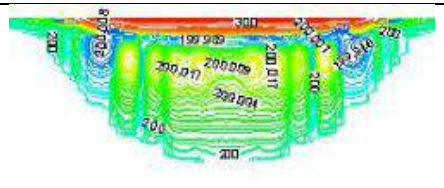
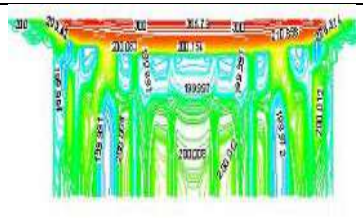
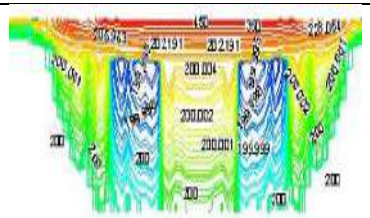
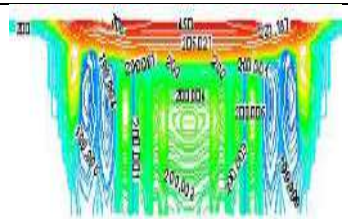
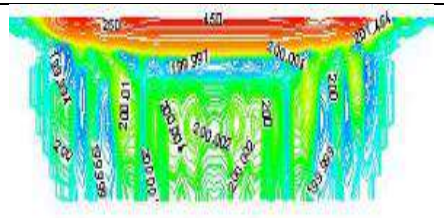
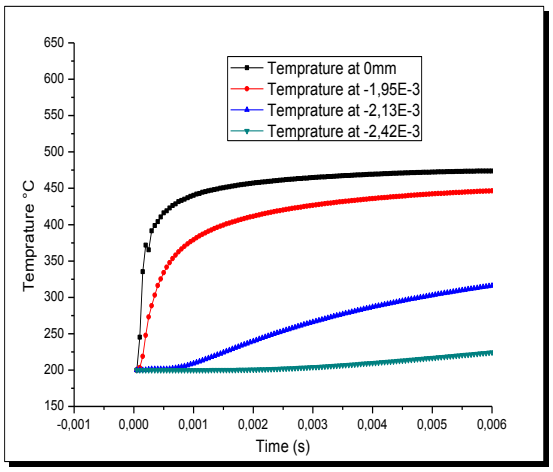


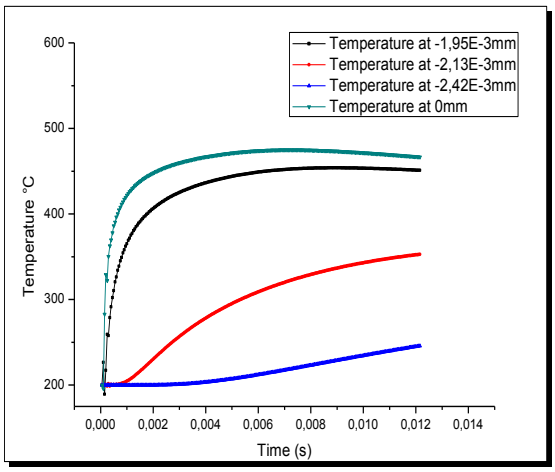
Figure IV.7 Comparaison des profils de température dans le temps pour quatre positions au point d'impact.

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

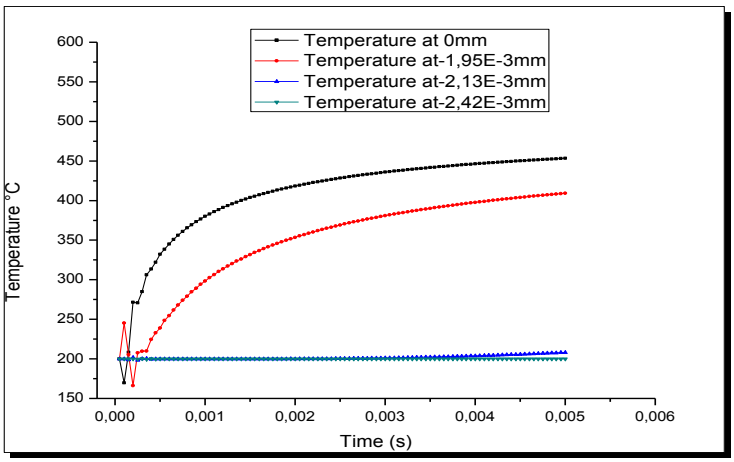
	Sans couche d'oxyde	0.1	0.3	0.5
0.05				
0.15				
0.7				
3				
8				



a.0.1mm



b.0.3mm



c.0.5mm

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

La Figure IV.9, illustre les distributions de la pression au point d'impact au cours de l'étalement de la goutte pour les quatre cas. Au début d'étalement de la goutte, la pression est plus élevée au point d'impact égale a (250 kPa), où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente. Cependant, on constate que la pression générée dans les cas a permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, l'augmentation de pression à l'impact dans le troisième et le quatrième cas est plus grande que celle dans les deux premiers, ce qui favorise la collision de

lamelle sur le substrat dans ces points est bonne que dans le premier point.

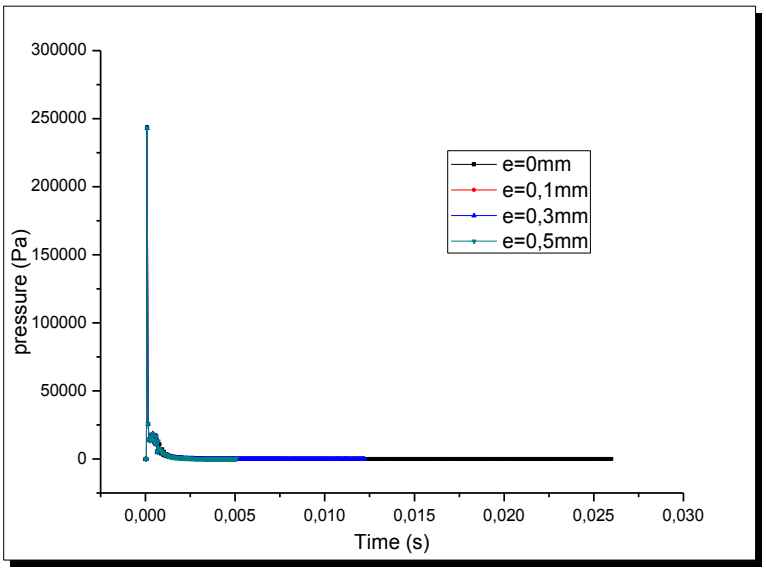
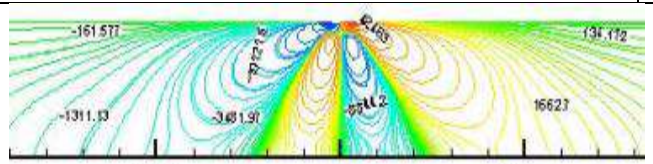
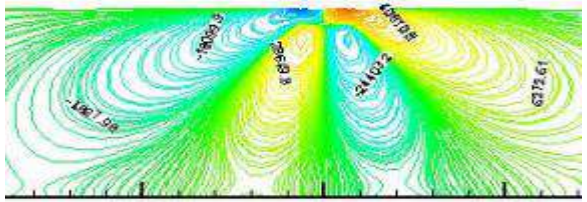
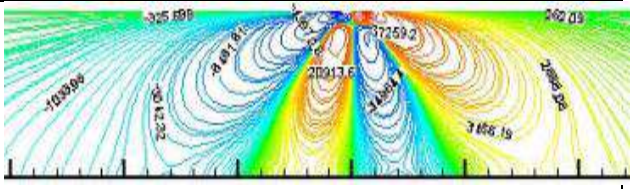
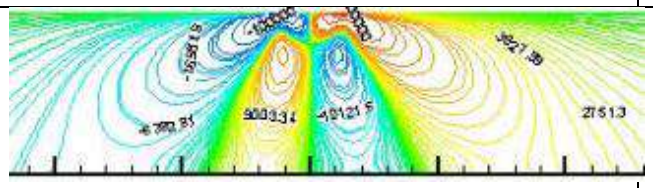
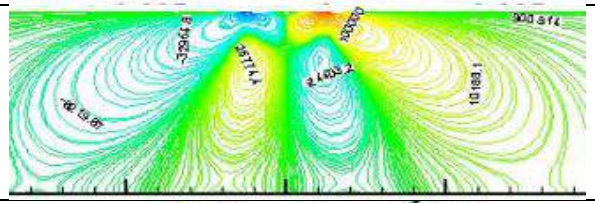
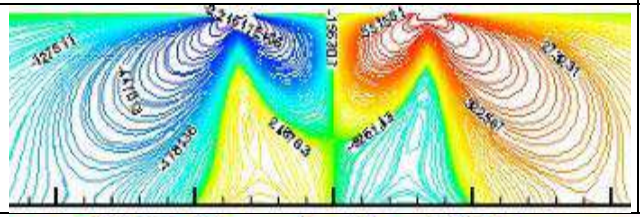
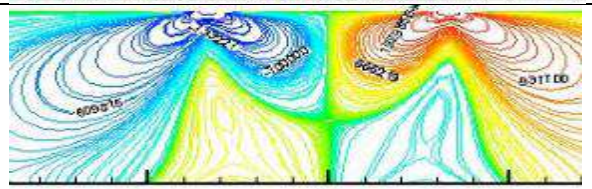
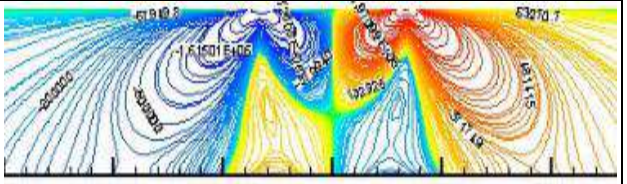
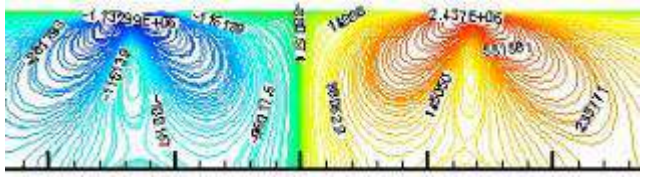
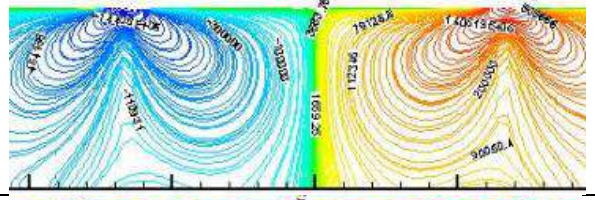
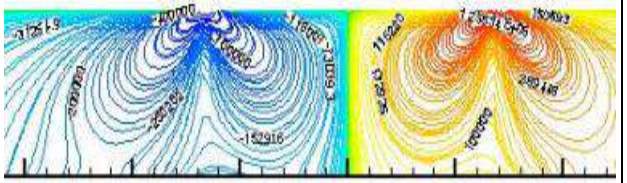
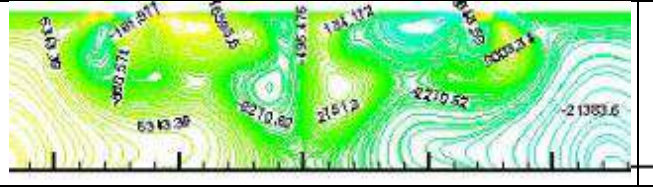
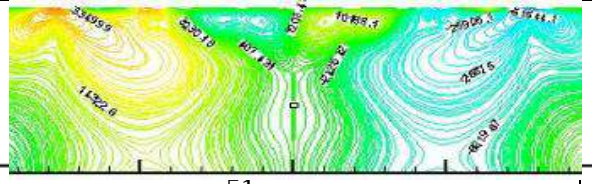
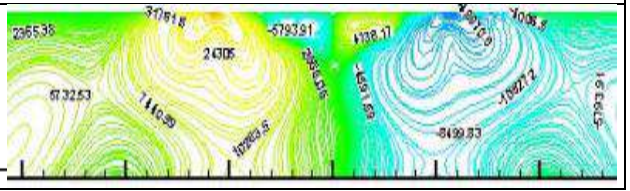


Figure IV.9 La variation de la pression d'impact pour les quatre cas.

Tableau IV.4 Représentation spatial des contraintes XY pour les trois cas

	0.1	0.3	0.5
0.05			
0.15			
0.7			
3			
8			

- **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 explication 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.

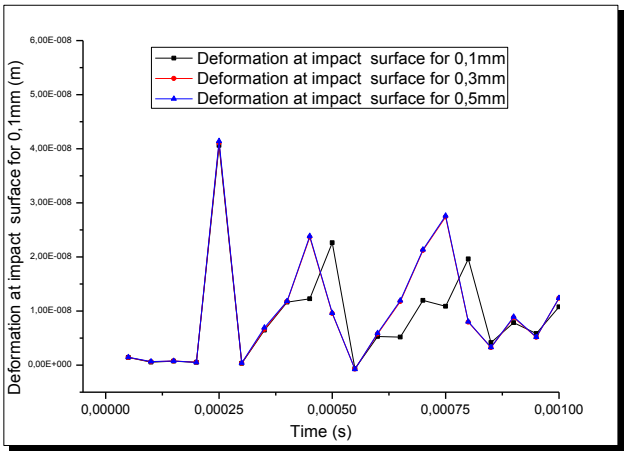
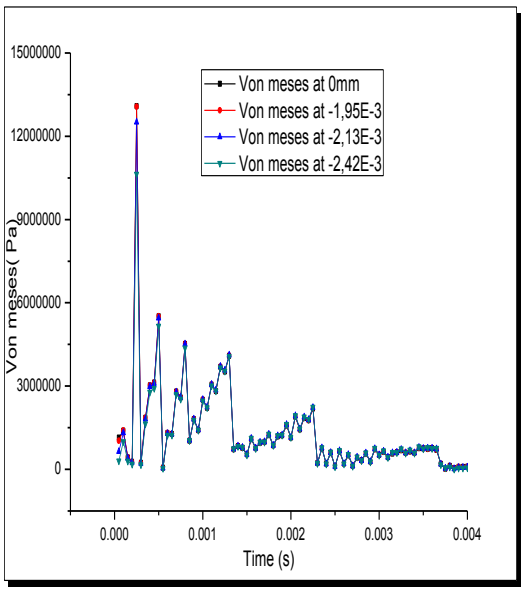
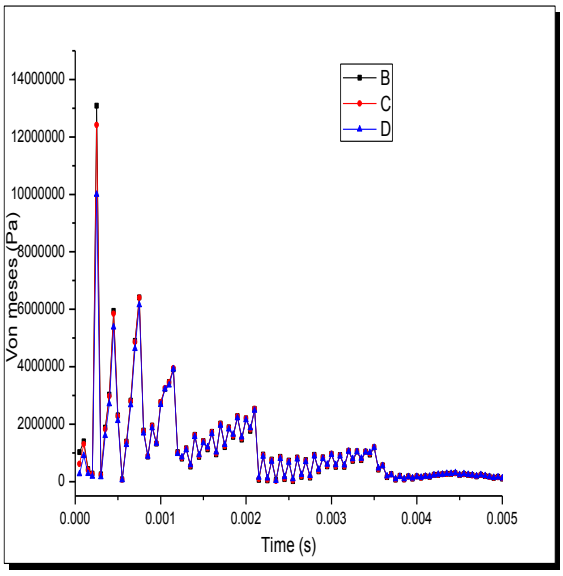


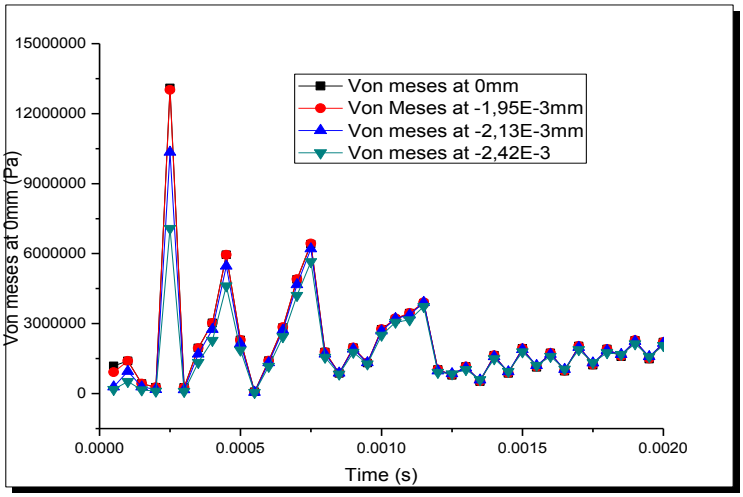
Figure IV.10 Déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas



a.0.1mm



b.0.3mm



c.0.5mm

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

Conclusion

Les résultats issus du modèle numérique présentés dans ce chapitre montrent l'effet des différents paramètres mis en jeu sur le processus d'étalement et de la solidification des lamelles d'aluminium déposées sur des substrats métalliques (acier à outil H13). L'ensemble de ces résultats permet de montrer que :

- L'épaisseur de la couche d'oxyde agit directement à l'étalement et la solidification, de goutte d'aluminium sur une surface de substrat d'acier, la vitesse de solidification par l'augmentation de la résistance thermique d'une part dû à la faible conductivité de la couche.
- La couche d'oxyde altère le transfert thermique lamelle-substrat et entraîne une solidification plus lente des lamelles.
- La qualité de lamelle varie proportionnellement avec l'épaisseur de la couche d'oxyde et elle favorise l'apparition des splats éclaboussées.

Conclusion générale

Conclusion générale

La pulvérisation de gouttelettes métalliques ou céramique sur un substrat en vu de la fabrication d'un revêtement fin est un procédé industriel largement utilisé. Mais les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont encore partiellement maîtrisés car les interactions entre ces particules fluides, la solidification ainsi que la refusion éventuelle par projection de gouttes sur les précédentes sont difficiles à analyser expérimentalement à cause des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de milliseconde et du millimètre. Il est donc nécessaire de faire appel à un outil numérique complexe pour prendre en compte les divers aspects physiques de la pulvérisation.

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 lamelle sur un substrat pré-oxyde.

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 sur substrat d'acier en présence de couche d'oxyde et en utilisant la méthode FSI, les résultats obtenues montrent que le paramètre étudié joue 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 :

- La variation de l'épaisseur de la couche d'oxyde joue un rôle très important sur la formation de lamelle.
- La couche d'oxyde altère le transfert thermique lamelle-substrat et entraîne une solidification plus lente des lamelles.

- La qualité de lamelle varie proportionnellement avec l'épaisseur de la couche d'oxyde et elle favorise l'apparition des splats éclaboussées.

Références

Références:

[1] Vinh Nguyen Duya, b, Truong V. Vu c, ⇑ a numerical study of a liquid drop solidifying on a vertical cold wall Pages 302-312 2018.

[2] Hanene, Z., Alla, H., Abdelouahab, M., Roques-Carmes, A numerical model of an immiscible surfactant drop spreading over thinliquid layers using CFD/VOF approach 0927-7757/ T.2020.

[3] Alessandro Franci, Eugenio Onate, Josep Maria Carbonell, ˜MicheleChiumenti PFEM formulation for thermo-coupled FSI analysis. Application to nuclear core melt accident S0045-7825(17)30114-7 2017.

[4] Delong Jia, YancongLiu, PengYi, XianghuaZhan, Jian Ma JavadMostaghimibSplat formation mechanism of droplet-filled cold-textured groove during plasma spraying 2020.

[5] GangtaoLiang, YangChen, HaibingYu, LiuzhuChen, ShengqiangShen; Wave propagation on splat induced by liquid drop impingement; Volume 76, July–August 2019, Pages 122-131.

[6] Wei Xiong, Ping Cheng; Numerical investigation of air entrapment in a molten droplet impacting and solidifying on a cold smooth substrate by 3D lattice Boltzmann method; Volume 124, September 2018, Pages 1262-1274

[7] Kshitiz KumarSubedi[a]Song-CharngKong[b]Chol-Bum M.Kweon[c] ;Numerical Study of Consecutive Drop/Wall Impacts Using Smoothed Particle Hydrodynamics ;2022.

[8] Hong-zheng Duan Yan-qing Wu Kun Yang Feng-lei Huang; Numerical simulation of drop weight impact sensitivity evaluation criteria for pressed PBXs ;2022.

[9] S.Annerela T.Claessensb J.Degrootea P.Segersc J.Vierendeelsa ; Validation of a numerical FSI simulation of an aortic BMHV by in vitro PIV experiments ; Volume 36, Issue 8, August 2014, Pages 1014-1023.

[10] Cédric Le Bot a, Stéphane Vincent a, Erick Meillotb, Frédéric Sarreta, Jean- Paul Caltagironea, Luc Bianchi Numerical simulation of several impacting ceramic droplets with liquid/solid phase changeF-33607 Pessac 2014

[11] C. MOREAU, J. F BISSON, R. S. LIMA, B. R MARPLE, Diagnostic for advanced material sprocessing by plasma spraying, Pure Appl. Chem., 77 (2), p 443-462 (2005).

[12] A.A. SYED, A. DENOIRJEAN, P. DENOIRJEAN, J.C LABBE, P. FAUCHAIS, Investigation of phenomena influencing properties of plasma sprayed ceramic-metal composite deposits, High Temperature Material Processes, 8 (2), p 253-272 (2004).

[13] ASIF ANSAR SYED, Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc. Theses de l'université de Limoges N° d'ordre 3-2004 (2004).

[14] H. SINGH, B. S. SIDHU, D. PURI, S. PRAKASH, Use of plasma spray technology for de position of high temperature oxidation/corrosion resistant coatings – a review, Materials and Corrosion, 58, (2), p 92-102 (2007).

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

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

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

[18] P. FAUCHAIS, J.F. COUDERT, M. VARDELLE, A. VARDELLE, A. DENOIRJEAN, Diagnostics of thermal spraying plasma jets, J. Thermal Spray Technology, 1 (2), pp 117-128 (1992).

[19] M. I. BOULOS, P. FAUCHAIS, E. PFENDER, Thermal plasmas: Fundamentals and applications- Vol. 1, (pub.) Plenum Publishing Corporation, New York, USA, (1994).

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

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

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

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

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

[25] B. PATEYRON, M.F. ELCHINGER, G. DELLUC, P. FAUCHAIS, Thermodynamic and transport properties of Ar-H2 and Ar-He plasma gases used for spraying at atmospheric pressure: Properties of mixtures, Plasma Chem. And Plasma Proc., 12 (4),pp 421 (1992).

[26] 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).

[27] WU S., Polymer Interface and Adhesion, 1st ed., Marcel Dekker, 1982.

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

[29] JEANDIN M., KOIVULUOTO H., VEZZU S., Coating Properties, in: Modern Cold Spray, ed. J. Villa fuerte, Springer, 2015, p. 107-224

[30] HU H.X., JIANG S.L., TAO Y.S., XIONG T.Y., ZHENG Y.G., Cavitation erosion and jet impingement erosion mechanism of cold sprayed Ni–Al2O3 coating, Nuclear Engineering Design, 241, 2011, p. 4929- 4937.

[31] GUETTA S., Influence des conditions d'impact sur l'adhérence de cuivre projeté dynamiquement sur de l'aluminium, Thèse de doctorat, MINES Paris Tech, Février 2010.

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

[33] PETRIE E.M., Plastics and elastomers in adhesives, in: Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, ed. C.A Harper, 4th éd., McGraw-Hill, 2002, p. 397-505.

[34] LI W.Y., ZHANG C., GUO X.P., DEMBINSKI L., LIAO H., CODDET C., Impact Fusion of Particle Interfaces in Cold Spraying and Its Effects on Coating Microstructure, in: Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, ed. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, C.J. Li et al., ASM, 2007, p. 60-65

[35] BERNDT C.C., LIN C.K., Measurement of adhesion for thermally sprayed materials, Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, p. 1235-1264

[36] SILVER E., CHASSAING E., GORYACHEV S.B., Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Journal de Physique IV, 2003, 106, p. 131-140

[37] SEXSMITH M., TROCZYNSKI T., Peel adhesion test for thermal spray coatings, Journal of Thermal Spray Technology, 1994, 3, p. 404-411

[38] HANG Y., LIU G., HUANG K., JIN W., Mechanical properties ad interfacial adhesion of composite membranes probed by in-situ nano-indentation/scratch technique, Journal of Membrane Science, 494, 2015, p.205-215

[39] JOHNSTON R.E., EVANS W.J., Freestanding abradable coating manufacture and tensile test development, Surface & Coatings Technology, 202(4-7), 2007, p. 725-729

[40] AMADA S., YAMADA H., YEMATSU S. et al., Modelling and measurements of adhesive strength of thermal sprayed coatings, in: International Thermal Spray Conference, Orlando, 28 May-5 June 1992, p. 915-920

[41] RICKERBY D.S., A review of the methods for the measurement of coating-substrate adhesion, Surface and Coatings Technology, 1988, 36, p. 541-557

[42] FABRE G., Influence des propriétés optiques et de l'endommagement de barrières thermiques *EB*-PVD pour la mesure d'adhérence par choc laser LASAT-2D, Thèse de doctorat, MINES Paris Tech, Décembre 2010

[43] COSTIL S., CODDET C., ROSA G. et al., Non destructive testing for the estimation of the adhesion of plasma sprayed coatings, in: Thermal Spray 2001 : New Surfaces for a New Millennium, ed. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, ASM, 2001, p. 1229-1234

[44] ROSA G., OLTRA R., CODDET C., COSTIL S., Quantification of plasma sprayed coating adhesion using pulsed laser induced decohesion technique, Surface Engineering, 17(6), 2001, p. 472-476

[45] C. RICHARD, Étude des caractéristiques mécaniques de revêtements projetés par procédés thermiques, Thèse de l'UTC, Compiègne, Déc. 1992

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

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

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

[49] H. HERMAN, S. SAMPATH, Plasma spray forming, Ind. Ceram., 18 (1), pp 29-32. (1998)

[50] B.E. LAUNDER, D.B. SPALDING, , The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp 269-289 (1974).

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

[52] M.I Boulos., P. Fauchais., E Pfender. Thermal Plasmas Fundamentals and applications, Vol.1, Plenum Press, New York.ISBN 0-306-44607-3. (1994)

[53] M. KHALID FATAOUI, Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique. Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, (2007).

[54] M. VARDELLE. "Etude expérimentale des transferts de chaleur, de quantité de mouvement et de masse entre un plasma d'arc à la pression atmosphérique et des particules solides", Thèse de doctorat, Université de Limoges. (1987).

[55] 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).

[56] F. BEN ETTOUILI., Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc, Thèse de doctorat de l'université de Limoges, N° 8, avril (2008).

[57] S.V. JOSHI AND R .SIVAKUMER, « Particle behavior during high velocity oxy-fuel spraying ».Surface and coating technology, 50-67 (1991).

[58] E. BOURDIN, P. FAUCHAIS, M. I. BOULOS, Transient heat conduction under plasma condition, Int. J. Heat and Mass Transfer, 26 (4), p 567-582, (1983)

[59] M.N. Ozisik, Heat Transfer, 2ème Edition, New York: Wiley-InterscincePublication, (1993).

[60] H.CARSLAW, J. JAEGER, Conduction of heat in solids, (Ed.) Oxford: Claredon Press, (1959)

[61] 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)

[62] 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).

[63] Sobolev V.V. (1998)"Formation of splat morphology during thermal spraying". Materials Letters, vol. 36, pp, 123-127.

[64] Ait moudid L. (2007)"Couplage Fluide-Structure pour la simulation numérique des écoulements fluides dans une conduite `a parois rigides ou élastiques, en présence d'obstacles ou non". Thèse de doctorat, Université d'Artois.

[65] Patru J. (2005) "Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircone et d'Acier". Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[66] Vincent D. (2007) "Contribution à l'Etude des Propriétés Optiques de Dépôts Plasma de Zircone Yttriée: Influences de leurs Caractéristiques Microstructurales et Physico-chimiques". Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[67] Pironneau O. (1988) "Méthodes des éléments finis pour les fluides",Thèse de doctorat, Masson, Paris

[68] Manual of Ansys. 2011

[69] Minxia Xue. Yoav Heichal . Sanjeev Chandra . Javad Mostaghimi ″ Modeling the impact of a molten metal droplet on a solid surface using variable interfacial thermal contact resistance″.J Mater Sci (2007)

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