REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : énergétique

Etude paramétrique de l'étalement et la solidification des particules sur substrat par combinaison de méthode VOF et interaction fluide structure

---

Présenté par :

Mr. Loukerif walid

Mr. rahmoune abdenaceur

Proposé et Dirigé par :

Prof. Zirari Mounir

Promotion Juin 2023

Remerciements

Tout d'abord, Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné l'encourage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre promoteur **Pr. mounir zirari**, Professeur à l'Université Yahia Fares, Médéa, pour l'aide qu'il nous a apportée, pour sa patience et sa rigueur scientifique .Ses conseils nous ont été précieux dans l'organisation du travail.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'il nous fait en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à nos parents et amis qui nous ont apporté´ leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon travail. Et aussi tous les enseignants de Génie Mécanique de premier cycle.



Dédicace

Pour l'étoile source d'affection et persévérance

Pour l'être les plus chères au monde

Pour leur soutien moral

Ma mère et mon père

Je dédie cette modeste mémoire de Master

a

toutes ma famille : Loukerif

Sans oublier mes très chers amis :

A tous mes camarades de promotion

Et à toute personne à qui nous porte de

L'estime.

Loukrif walid



Dédicace

Pour l'étoile source d'affection et persévérance

Pour l'être les plus chères au monde

Pour leur soutien moral

Ma mère et mon père

Je dédie cette modeste mémoire de Master a :

toutes ma famille : Rahmoune

Sans oublier mes très chers amis :

A tous mes camarades de promotion

Et à toute personne à qui nous porte de L'estime

Rahmoune Abdenaceur



Résumé :

Une étude numérique par interaction fluide structure de l'impact oblique des particules sur un substrat lors de la formation des lamelles.

Le succès et la longévité d'un dépôt plasma dépendent fortement de la qualité de l'adhésion entre le dépôt et le substrat ou entre les lamelles formant le dépôt qui se forment par l'impact des particules de poudre entrant en collision avec le substrat. Par conséquent, dans ce travail nous proposons la simulation numérique par la méthode FSI, l'écrasement d'une particule de fon du alumine affecte indirectement un substrat en acier inoxydable, en utilisant la technique d'interaction structure-fluide en but pour mieux comprendre les phénomènes liés au comportement mécanique. à l'interface particule-substrat lors de la formation des lamelles.

Mots-clés : sédimentation, lamelle, effet, granulométrie, substrat, FSI, VOF, changement de phase, chaleur spécifique équivalente, élément fini,

دراسة عددية عن طريق التفاعل الهيكلي المائع للتأثير المائل للجسيمات على الركيزة أثناء تكوين الصفائحيعتمد نجاح واستمرارية ترسب البلازما بشدة على جودة الالتصاق بين الرواسب والركيزة أو بين الصفائح التي تشكل الرواسب التي تتشكل من تأثير اصطدام جزيئات المسحوق مع الركيزة. لذلك ، في هذا العمل نقترح المحاكاة العددية بطريقة FSI ، يؤثر سحق جسيم خلفية الألومينا بشكل غير مباشر على ركيزة من الفولاذ المقاوم للصدأ ، باستخدام تقنية التفاعل بين الهيكل والسوائل من أجل فهم أفضل للظواهر المتعلقة بالسلوك الميكانيكي. في واجهة الجسيمات الركيزة أثناء تكوين الصفيحة .

الكلمات المفتاحية: الترسيب ، الصفيحة ، التأثير ، حجم الجسيمات ، الركيزة FSI، VOF، تغيير الطور ، الحرارة النوعية المكافئة ، العنصر المحدد ،

Numerical study by fluid structural reaction of the oblique effect of particles on the substrate during plate formationThe success and continuity of plasma deposition strongly depends on the quality of adhesion between the sediment and the substrate or between the plates that form the sediment formed from the impact of the collision of powder particles with the substrate. Therefore, in this work we propose numerical simulation by FSI method, the crushing of the alumina background particle affects the form of Indirect on a stainless steel substrate, using the technique of interaction between structure and fluid for a better understanding of phenomena related to mechanical behavior. At the interface of the substrate particles during the formation of the lamina .

Keywords: sedimentation, lamina, impact, particle size, substrate VOF, FSI, phase change, specific heat equivalent, selected element,

➢ Liste Des Figures

Figure I.1 Principe Fondamental De La Projection Thermique……..……...……6
Figure I. 2 chéma d‟un Système du Procédé Projection Par Flamme ……...…....7
Figure I.3 Schéma D‟un Système Du Procédé Projection Par L‟arc……...…….9
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……..14
FigureI.5 Représentation Schématique de L'empilement des Lamelles Lord La Projection Plasma d'après …….17
Figure I.6 formation des contraintes résiduelles de traction……19
Figure I.7 Formation Des Contraintes Résiduelles De Compression …….20
Figure I.8 Test d'Almen ("Almen strip test") ……..……21
Figure I.9 Représentation Des Contraintes Résiduelles De Cisaillement……22
Figure II.1 : Répartition des phases pour trois problèmes bi phasiques types (A :Mélange homogène; B :Répartition statique des phases ; C : Problème dynamique de type changement de phase.)…….29
Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température……...33
Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface…….……34
Figure II.4: Différentes méthodes de suivi de front ……36
Figure II.5:Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque ……...36
Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret …….37
Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique…….….38
Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le tempe…..39
Figure III.1 Approche de ligne de courant d'Upwind ……49
Figure IV.1 : 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……..63
Figure IV.2 : Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions……...64
Figure IV 3 : Champ de température en fonction de temps pour quatre positions transversale dans le substrat……..65
Figure IV 4 : déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=4.5°)…….....66

Liste des figures

Figure IV 5 : Von misese stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps…..….67
Figure IV.6 déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=4.5°)…….68
Figure IV.7 : Von mises stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=4.5°)……69
Figure IV.8 : déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=8°)……70
Figure IV.9 : Von mises stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=8°)……71
Figure IV.10 : déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=12°)……..72
Figure IV.11 : Von mises stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=12°)……..73
Figure IV.12 Déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas……..74

Liste des tableaux

- **Les tableaux**

Tableau III.1 Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables……46

Tableau IV.1 Les prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés……61

Tableau IV.4 Représentation spatial des contraintes XY pour les trois cas……68

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	-
D	Diamètre de la Particule Etalée	m
Di	Coefficient de Diffusion de L‟espèce	-
d_p	Diamètre de la Particule	m
E :	Champ Electrique	$V.m^{-1}$
Ek	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

Liste des symboles

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	$J.kg^{-1}$
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
L_x , L_n ,L_c	¤ Echelle de Longueur	

Liste des symboles

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	$W.m^{-2}$
S_H	Terme Source Enthalpique	-
St	Nombre de Stefan	-
S_{ij}	Tenseur des Déformations Symétriques	-
T	Temps	s
T	Température	K
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	$m^2.K/W$

Liste des symboles

Sc	Nombre de Schmidt	-
ΔT	Gradient de température de couche Limite	K
y_i	Fraction Massique du Gaz i	-
We	Nombre de Weber	-
W_{ij}	Tenseur antisymétrique Rotation	-
E_{mij}	Opérateur tensoriel alternance.	-
V	Vitesse moléculaire	m/s
A	Diffusivité thermique	m^2/s
P	Masse volumique de la particule	kg/m^3
Ω	Taux de dissipation spécifique	-
Ωm	Vitesse angulaire du système de coordonnées	m/s
Γ	Tension superficielle	N/m
Θ	L‟angle de contact	rad

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Liste des figures et des tableaux

Liste des symboles

I.Introduction……..6

I.1.La projection thermique…….. 6

I.1.1. La projection par flamme…… 6

I.2. La projection par arc électrique…… 9

I.2.1. La projection arc-fil……. 6

I.2.2. La projection par plasma d'arc soufflé……...…9

I.3. Traitement des particules dans le plasma……. 10

I.3.1. Injection et Co-injection des particules dans le plasma……. 10

I.4. Interactions plasma-particules…… 11

I.5. La théorie de l'adhésion……12

I.5.1. Ancrage mécanique…… 13

I.5.2. Théorie de la diffusion……14

I.6. Préparation de surface, rugosité et adhésion……..15

I.7. Quantification de l'adhérence des revêtements……..15

I.8. Construction d'un dépôt projeté plasma……16

I.9. Détermination des contraintes résiduelles……...17

I.9.1. Genèse des contraintes résiduelles…… 18

I.10. Domain d'utilisation…….. 22

I.10.1. Protection contre la corrosion…… 23

I.10.2. Corrosion sèche…….. 23

I.10.3. Corrosions humides……. 24

I.10.4. Protections contre l'usure……... 24

I.10.5. Usure par corrosion……. 24

I.10.6. Usure par adhésion……..24

I.10.7. Application aéronautiques……. 25

Conclusion…… 26

II. Introduction :……..28

II.3. Model dynamique :…… 29

II.3.1.2 L'équation de quantité de mouvement …….. 30

III.3.1.2 Équation de l'énergie…….. 30

II.4. Modèle thermique……30

II.3.1.1 Transfert de chaleur avec changement de phase……. 31

II.4.1.1. Méthode à grille mobile…… 31

II.4.1.2. Méthode à grille fixe……. 32

III.4.1.2. Méthode d'enthalpie ……. 32

II.4.1.2. Méthode de la chaleur spécifique équivalente …….. 33

II.4.2. Modèle thermique utilisé…… 34

II.5. Calcul d'interfaces…… 34

II.5.2. méthode eulérienne……... 35

II.5.2.2. Les méthodes de suivi de volume……. 36

II.5.3. La Méthode VOF……. 37

II.6. Conclusion …… **40**

III. Introduction…… **42**

III.1. Résolution numérique……..**42**

III.2. Discrétisation des équations……**42**

III.3. Résolution des équations par éléments finis…….. **43**

III.3.1. Méthodes des éléments finis……43

III.3.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis……. 44

III.3.2.1. Formulation variationnelle forte……44

III.3.2.2. Formulation variationelle faible……. 45

III.3.3. Forme généralisée des équations du système et discrétisation…… 46

III.3.3.1. Terme temporelle……. 47

III.3.3.2. Terme d'advection…… 48

III.3.3.3. Terme de Diffusion…….. 51

III.4. Interaction entre particule-structure…….. 52

Conclusion……54

IV. Introduction ……...……56

IV.1ANSYS ……...…….56

IV.1.1. Les points forts d'outils ANSYS sont……...…..……56

IV.1.2. Les outilles de simulation se présentent sous plusieurs niveaux……..57

IV.2. Matériaux utilisés…….……58

IV.2.1. L'aluminium……...……..58

IV.2.2. Propriétés des particules à l'impact……...59

IV.3.Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue…….....62

IV.3.1. Identification…….……62

Conclusion…….……76

Conclusion générale……..78

Référence……...81

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les revêtements de surface sont couramment utilisés dans de nombreux secteurs industriels pour améliorer les propriétés des matériaux de base tels que la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la conductivité thermique, ou encore l'esthétique. Parmi les techniques de revêtement, la pulvérisation de plasma céramique est une méthode courante pour produire des revêtements épais.

Cependant, les propriétés finales du revêtement dépendent des conditions d'impact des gouttelettes sur le substrat, ce qui peut entraîner une porosité variable. Pour mieux comprendre et contrôler ces propriétés, il est important de simuler l'étalement et la solidification des particules lors de la pulvérisation de plasma céramique.

Dans ce contexte, l'utilisation de méthodes numériques telles que la méthode VOF (Volume Of Fluide) combinée avec une interaction fluide-structure (IFS) peut fournir une solution efficace pour simuler le comportement des particules lors de la pulvérisation.

La méthode VOF est une méthode de suivi de frontière qui permet de représenter la géométrie de l'interface entre deux fluides ou entre un fluide et une structure solide. L'IFS permet de prendre en compte l'interaction entre le fluide et la structure solide en mouvement.

En combinant ces deux méthodes, il est possible de simuler l'étalement et la solidification des particules lors de la pulvérisation de plasma céramique sur un substrat. Une étude paramétrique peut être effectuée en variant les paramètres tels que la vitesse d'impact, la température, la taille et la forme des particules, afin de mieux comprendre l'impact de ces paramètres sur les propriétés du revêtement final.

Cette approche de simulation numérique peut fournir des informations précieuses pour optimiser les conditions de pulvérisation et améliorer la qualité des revêtements de surface

Bot et al. [1]. se concentre sur les simulations numériques d'impact et de solidification de plusieurs gouttelettes de céramique sur un substrat solide, qui est couramment utilisé dans la projection plasma céramique pour fabriquer des revêtements épais. Les conditions d'impact des gouttelettes ont une grande influence sur les caractéristiques du produit final. L'objectif de la simulation numérique est de mieux comprendre les propriétés du revêtement lors de sa fabrication en examinant les évolutions de flux thermique et de fraction solide dans le temps

pour une configuration donnée. Le code numérique utilisé pour la simulation est basé sur une discrétisation en volumes finis, Zhing et al. [2]. Un système expérimental est mis au point pour produire et déposer des gouttelettes uniformes d'aluminium fondu. Un modèle est utilisé pour décrire l'angle incliné du dépôt de gouttelettes à différents rapports de décalage. Un modèle de transfert de chaleur est proposé pour aider à sélectionner les paramètres de température appropriés. Les résultats montrent la faisabilité de la fabrication de piliers en aluminium inclinés directement non soutenus en utilisant des microgouttelettes uniformes. La microstructure interne de la fusion des gouttelettes est également étudiée pour assurer une bonne liaison métallurgique. Shen et al. [3]. Le modèle utilise les équations de Navier-Stokes, les équations de bilan énergétique, l'équation de et un modèle de champ de phase pour la formation de microstructures de solidification. Le modèle a été testé et validé par des simulations numériques et comparé aux résultats expérimentaux. Les simulations ont montré que la microstructure de solidification formée dans la gouttelette d'étalement était principalement constituée de grains colonnaires.

Galenko et al. [4]. Le concept de rupture d'ergodicité est introduit, qui se produit lorsqu'un système n'a pas assez de temps pour explorer tous les états microscopiques possibles lors de processus rapides ou lorsqu'il est soumis à de forts flux. Les effets du non-équilibre sur la cinétique de l'interface, le piégeage des solutés et la traînée des solutés sont analysés, et les prédictions théoriques sont comparées aux expériences et aux simulations de dynamique moléculaire. Li et al. [5]. Les mécanismes physiques du processus de fusion, y compris le liquide en vrac, les effets de capillarité, le transfert de chaleur et la solidification, sont identifiés et quantifiés numériquement à l'aide de modèles 3D basée sur une méthode de volume de fluide. Les effets de la distance entre les gouttelettes sur les formes finales du régime d'impact sont examinés, ce qui est essentiel pour un contrôle efficace du processus dans la fabrication par dépôt de microgouttelettes métalliques. Bai et al. [6]. Cette étude analyse le mécanisme de formation d'un revêtement de zircone stabilisée à l'oxyde d'yttrium à structure lamellaire fine lors de la projection plasma atmosphérique supersonique. Les particules en vol ont fondu et se sont brisées en raison d'un fort couplage avec le jet de plasma supersonique, ce qui a donné des particules plus petites que celles de la pulvérisation plasma atmosphérique conventionnelle. Cela a conduit à la formation d'éclaboussures en forme de disque avec une épaisseur et une rugosité de surface inférieures, réduisant les défauts et entraînant une propriété mécanique plus élevée dans le revêtement. Chandra et al. [7]. Les

gouttelettes s'aplatissent et se solidifient, formant des éclats en forme de disque ou fragmentés selon les conditions d'impact. Plusieurs gouttelettes fusionnent pour former une couche solide. Des modèles numériques tels que Monte Carlo et l'hydrodynamique des particules lissées peuvent être utilisés pour simuler l'impact et la coalescence des gouttelettes dans un spray et prédire les propriétés du revêtement. Cheng et al. [8]. On constate que les bulles nucléés sur les sommets des piliers hydrophobes ou sur les fonds des cavités hydrophiles en fonction de la mouillabilité et de la température. Le dissipateur de chaleur bio-inspiré avec des sommets de piliers hydrophobes et une base hydrophile offre les meilleures performances de transfert de chaleur en ébullition en raison de caractéristiques uniques, ce qui entraîne des courbes d'ébullition de piscine très différentes. Zhang et al. [9]. Les effets de la fraction d'entrée et de la température sous-refroidie sur le transfert de chaleur de condensation sont étudiés numériquement. Les résultats montrent un bon accord avec un modèle analytique existant et fournissent une simulation numérique directe du transfert de chaleur par condensation forcée laminaire en présence d'un gaz non condensable sans l'utilisation de corrélations empiriques. Zuo et al. [10]. L'étude montre qu'une solidification locale et une refusions inter faciale se produisent lors du dépôt initial, et que les comportements de solidification et d'oscillation ultérieurs des gouttelettes affectent la formation et la distribution de la morphologie de la surface solidifiée. Une relation semi-quantitative entre la morphologie externe et la microstructure interne est proposée, ce qui peut aider à l'optimisation des processus et à la détection non destructive des techniques d'impression 3D à base de gouttes. Des méthodes numériques et expérimentales sont utilisées pour étudier ces phénomènes.

Cheng et al. [11]. L'apparition, la croissance et le départ des bulles à partir de cavités hydrophiles et hydrophobes sur des surfaces chauffées ont été étudiés à l'aide d'une méthode de Boltzmann en réseau pour les changements de phase liquide-vapeur. Les résultats ont montré que la nucléation se produit au centre des cavités hydrophiles et aux coins des cavités hydrophobes. Le diamètre de départ des bulles augmente avec l'angle de contact, et les dimensions de la cavité influencent le comportement des bulles et le flux de chaleur d'ébullition. La position de la ligne de contact à trois phases influence la direction du transfert de chaleur. Les cavités hydrophobes favorisent la nucléation, tandis que les surfaces hydrophiles limitent l'expansion de la ligne de contact.

CHAPITRE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.Introduction

La projection plasma fait partie des techniques de projection thermique. Elle consiste à déposer des matériaux métalliques et non métalliques fondus ou semi-fondus sur un substrat prépar[12,13]. Les particules du matériau d'apport sont fondues ou rendues plastiques grâce à une source de chaleur, puis accélérées avant de se solidifier sur la surface à recouvrir[14]. La projection thermique par flamme a été proposée au début du XXe siècle par le Dr Schoop. Initialement utilisée pour les matériaux à bas point de fusion tels que l'étain et le plomb, elle a été étendue aux aciers et aux matériaux réfractaires[15]. Ces techniques sont largement utilisées dans diverses industries pour des applications de protection, de réparation et d'ajout de fonctionnalités aux surfaces.

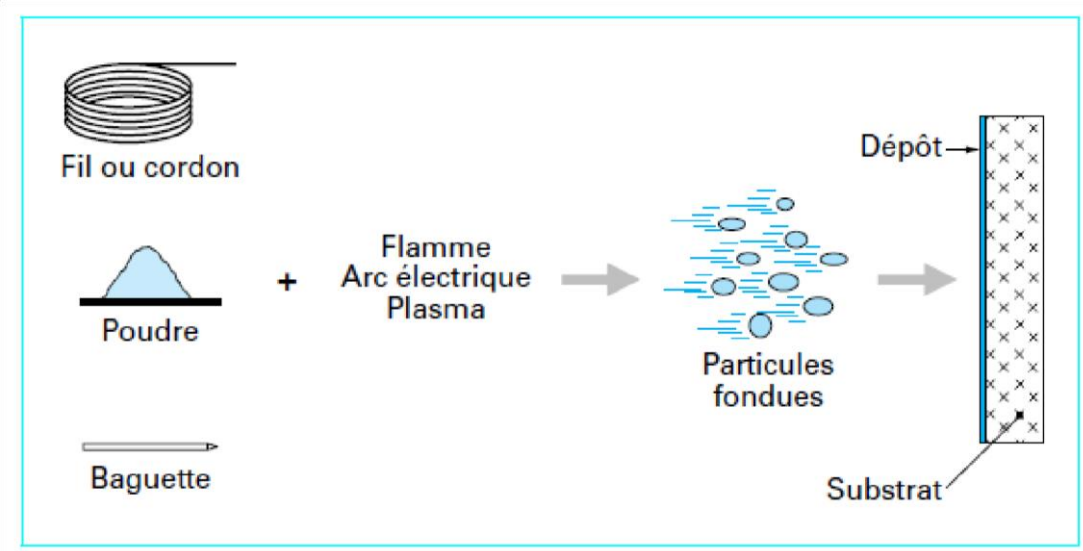


Figure I.1 Principe Fondamental De La Projection Thermique [14]

Deux familles de projection thermique : flamme de combustion et arc électrique comme sources de chaleur.

I.1. La projection thermique

I.1.1.La projection par flamme

La projection thermique utilisant une réaction chimique comme source d'énergie permet d'introduire les matériaux à projeter sous forme de poudre ou de fil/tige/cordon (pour les céramiques). La température de fusion est limitée à 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme dans le premier cas, mais peut atteindre 0,95 fois

dans le second. Les matériaux déposés par cette technique sont généralement des métaux, alliages, cermets ou céramiques à faible point de fusion.

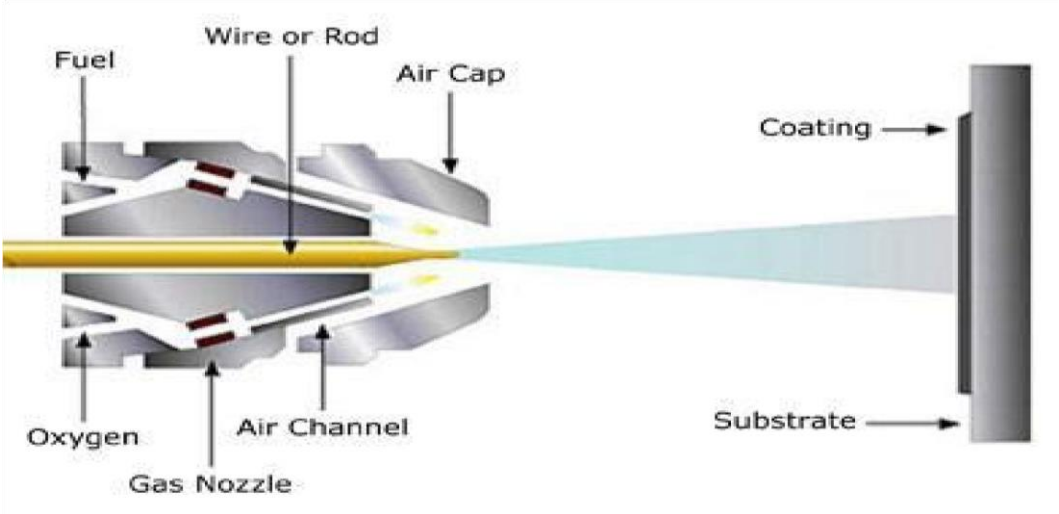


Figure I. 2 Schéma d‟un Système du Procédé Projection Par Flamme [14].

I.1.1.1.La projection flamme-poudre

La technique de projection thermique par flamme oxygène gaz combustible utilise des particules de matériau projetées sous forme de poudre. Les particules sont accélérées par le gaz porteur ou par une injection d'air dans la flamme. Les dépôts obtenus ont une faible adhérence (20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %), principalement en raison de la faible vitesse d'impact des particules (environ 30 m/s).

I.1.1.2.La projection flamme-fil

Dans ce type de projection thermique, 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 est utilisée uniquement pour fondre l'extrémité du fil ou du cordon. L'acheminement des matériaux fondus vers le substrat est assuré par un jet d'air comprimé.

I.1.1.3.Projection supersonique par combustion

Cette technique se distingue par la vitesse élevée (300 à 600 m/s) des particules projetées grâce à l'échappement des gaz de combustion provenant d'une chambre à pression élevée (0,5 à 1 MPa). La chambre de combustion est refroidie et les gaz s'échappent par une tuyère convergente-divergente, suivie d'un fût pour limiter l'aspiration de l'air ambiant. La poudre est injectée dans la flamme à l'aide d'un gaz neutre porteur, soit en amont (à une pression supérieure à celle de la chambre de combustion), soit en aval (à proximité de la pression atmosphérique). Deux procédés se distinguent : le procédé HVOF (High Velocity Oxy-Fuel Flame) utilisant la combustion oxygène-carburant gazeux (propane, propylène, tétère, méthane, hydrogène ou kérosène) et le procédé HVAF (High Velocity Air-Fuel Flame) utilisant un mélange comprimé de kérosène et d'air. Dans les deux cas, les particules atteignent des vitesses de 300 à 600 m/s, ce qui permet un écrasement efficace des particules à l'état plastique.

I.1.1.4.Le canon à détonation

Dans ce procédé de projection thermique, le matériau d'apport sous forme de poudre et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits simultanément dans un tube fermé à une extrémité, appelé tube de détonation. Une étincelle provoque l'explosion du mélange de gaz, créant une onde de choc maintenue par la combustion. Le gaz brûlé est évacué et le gaz explosif frais est introduit pour renouveler l'explosion jusqu'à 8 fois par seconde. Les particules de poudre sont ainsi chauffées et éjectées à une grande vitesse (jusqu'à 1200 m/s) par l'onde de choc en déplacement à des vitesses pouvant atteindre 2900 m/s. Les dépôts obtenus sont compacts (porosité inférieure à 1 %), adhérents (généralement supérieure à 80 MPa) et présentent une faible rugosité (Ra = ± 3 μm). Les taux de dépôt horaires sont de 3 à 5 kg/h et l'épaisseur de dépôt est généralement inférieure à 0,2 mm.

Cependant, ce procédé présente des contraintes au niveau des installations en termes de dimensions et de bruit élevé (plus de 140 dB), ce qui limite 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 :

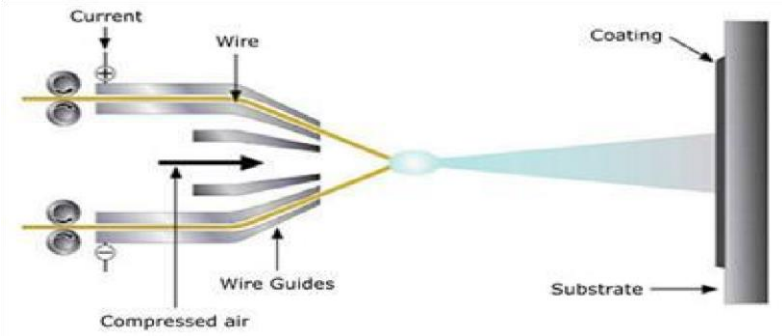


Figure I.3 Schéma D‟un Système Du Procédé Projection Par L‟arc [14]

I.2.1.La projection arc-fil

Dans ce procédé, deux fils composés du matériau à projeter sont utilisés comme électrodes. Une tension continue de 25 à 40 V est appliquée aux bornes des fils, créant un arc à leurs extrémités. Un gaz d'atomisation soufflé entre les deux fils détache la partie fondue sous forme de gouttelettes, qui sont ensuite transportées jusqu'au substrat. Les taux de dépôt sont élevés (jusqu'à 20 kg/h) et les dépôts obtenus sont épais (de 0,5 mm à 3 mm).

Les matériaux pouvant être projetés doivent être conducteurs électriques et facilement filables, tels que le zinc, l'aluminium, le cuivre, le molybdène et l'acier. L'utilisation de fils fourrés, qui sont des fils avec une gaine métallique ductile remplie de poudres de matériaux non-ductiles, permet de réaliser des dépôts d'alliages (comme le NiCrAl, NiMoAl, FeCrMn) ou des dépôts métalliques renforcés par des céramiques (comme des carbures, etc.).

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, formant un plasma par l'éclatement entre une anode et une cathode. Le plasma est généré par une décharge haute tension et haute fréquence. Une partie du gaz plasmagène est chauffée à une température élevée, formant un jet de plasma dans la tuyère anode. Ce jet de plasma de recombinaison, avec une vitesse de 1000 à 2500

m/s, est utilisé pour projeter le matériau d'apport sous forme de poudre sur le substrat. Les particules fondues ou semi-fondues sont projetées à grande vitesse (100 à 300 m/s) et s'écrasent pour former le dépôt.

Les gaz plasmagènes utilisés sont généralement des mélanges de gaz primaires à densité élevée (argon, azote) et de gaz secondaires (hydrogène, hélium) pour améliorer le transfert thermique. Le jet plasma peut être utilisé à l'air ambiant, en atmosphère contrôlée, sous vide partiel ou en surpression.

La projection par plasma d'arc se distingue par un jet de plasma à température et enthalpie élevées, permettant de fondre les matériaux céramiques et les alliages réfractaires. Les vitesses des gaz et des particules sont relativement élevées, permettant des dépôts minces ou épais. Une large gamme de matériaux peut être projetée dans ce procédé.

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 à projeter sous forme de poudre est injecté localement dans le plasma à l'aide d'un ou plusieurs injecteurs métalliques. Un gaz porteur, généralement de l'argon, est utilisé pour transporter les particules. Les injecteurs sont positionnés perpendiculairement à l'axe de la torche[16,17] et ont des diamètres internes compris entre 1,2 mm et 2 mm pour limiter la dispersion du jet de poudre.

La position de la sortie de l'injecteur par rapport à la sortie de la tuyère et à l'axe de la torche est un paramètre important, car elle détermine la trajectoire du jet de poudre et donc le traitement thermique des particules par le plasma. Les différentes trajectoires des particules sont principalement influencées par leur distribution granulométrique, leur masse spécifique et les collisions entre les particules elles-mêmes ainsi qu'avec la paroi de l'injecteur(17,18]. Ces facteurs entraînent des variations significatives de la quantité de mouvement des particules dans le plasma, ce qui se traduit par des trajectoires divergentes en sortie de l'injecteur et donc des traitements thermiques différents.

Cette divergence des trajectoires est plus prononcée pour les particules fines, de taille inférieure à 20 microns,[17] et légères,[18] telles que l'alumine. En raison de la viscosité élevée des plasmas, le débit de gaz porteur doit être ajusté pour adapter la quantité de mouvement des particules en sortie de l'injecteur, permettant ainsi leur pénétration dans le plasma. Ce débit dépend des caractéristiques de la poudre, de l'injecteur et de la puissance dissipée du plasma.

Pour obtenir un rendement de projection maximal, il est essentiel que la majorité des particules injectées se déplace le long de la zone la plus chaude du plasma afin d'être complètement fondues. Le débit de gaz porteur doit donc être suffisant pour entraîner les particules au cœur du plasma sans les faire traverser trop rapidement.

L'injection d'une poudre composée de deux matériaux différents peut entraîner une ségrégation des particules dans le plasma, ce qui peut entraîner des hétérogénéités de composition dans le dépôt[19]. Ce problème peut être résolu en utilisant deux injecteurs séparés (co-injection). En fonction de la position des injecteurs et de la nature du matériau à projeter, les particules suivront différentes trajectoires[20], ce qui nécessite une maîtrise des paramètres d'injection pour obtenir la microstructure de dépôt souhaitée.

I.4.Interactions plasma-particules

La relation simplifiée proposée par Engelke (Équation 1-2) permet de relier l'état de fusion des particules par le jet de plasma aux paramètres caractérisant la torche à plasma. Cependant, l'équation n'a pas été fournie dans votre texte.

Il est mentionné que les interactions entre les particules dans le plasma sont négligeables,[16] sauf dans le cas de surcharge ou de "dense landing"[17]. Cela signifie que, dans des conditions normales de projection, les transferts entre le plasma et les particules restent les phénomènes les plus importants. Ainsi, la qualité d'un dépôt dépend principalement 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 la chaleur et le mouvement nécessaires à leur fusion et à leur accélération[21]. Les transferts de ces quantités entre le plasma et les particules influencent les trajectoires des particules et leur état

de fusion. Il est important de contrôler ces transferts pour obtenir la microstructure souhaitée dans le dépôt final[21].

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

L'équation (1-1) montre que l'état de fusion des particules dépend du temps de séjour des particules dans le jet plasma, des températures rencontrées et de la conductivité thermique moyenne du plasma. Ces valeurs sont elles-mêmes influencées par la nature des gaz plasmagènes et l'enthalpie fournie au plasma. Des recherches récentes ont également abouti à ces mêmes conclusions[23 ,24].

La nature et les propriétés des gaz présents dans la couche limite entourant chaque particule jouent un rôle important dans les transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le jet plasma et les particules. Cette couche limite est complexe en raison de la présence de particules élémentaires chargées et du gradient thermique entre l'enveloppe gazeuse et la surface de la particule. Elle peut présenter des écarts significatifs par rapport à l'équilibre chimique et cinétique, ce qui modifie les transferts entre le plasma et les particules.

Le transfert thermique entre le plasma et les particules est principalement dû aux mécanismes suivants[25,26] : 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 réactions chimiques, la conduction-convection dans la couche limite joue le rôle principal dans le chauffage des particules, et les effets de rayonnement sont négligeables[27]. Cependant, ces mécanismes peuvent être perturbés par des facteurs tels que 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 peut être définie comme l'état dans lequel deux organismes distincts sont maintenus ensemble par un contact interfacial intime grâce à des forces mécaniques ou à un travail transféré jusqu'à l'interface[27]. 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 été postulés pendant de nombreuses années pour expliquer les mécanismes d'adhésion[28]. Cependant, il a été établi récemment que l'adhésion d'un système ne peut pas être attribuée à un seul mécanisme, mais résulte en réalité d'une combinaison de plusieurs mécanismes à différentes échelles.

L'ancrage mécanique est influencé par le paramètre microscopique de surface de contact à l'interface entre les deux parties du système. La rugosité de la surface favorise[29] l'ancrage mécanique en augmentant la surface spécifique, c'est-à-dire la surface apparente.

Les mécanismes d'adhésion entre particules ou entre particules et substrat suscitent un grand intérêt et soulèvent encore de nombreuses interrogations[30]. Les principales hypothèses avancées pour expliquer l'adhésion sont liées aux mécanismes mécaniques[31] ou à la diffusion à l'état solide ou liquide[32].

I.5.1. Ancrage mécanique

La théorie de l'ancrage mécanique, développée par Mac Bain en 1926, explique que la matière en contact avec une surface pénètre dans les cavités ou les porosités de cette surface, formant ainsi des liaisons mécaniques. Cette contribution de l'ancrage mécanique[33] est bénéfique pour l'adhérence. Cependant, l'ancrage mécanique varie en fonction de la morphologie et des dimensions des rugosités de la surface, ce qui peut donner lieu à une région de transition plus ou moins épaisse appelée interface.

L'augmentation de l'adhérence de la surface est influencée par plusieurs facteurs, tels que l'ancrage mécanique, la formation d'une surface propre, la formation d'une surface activée et l'augmentation de la surface de contact. Les changements physiques et les propriétés chimiques de la surface contribuent à l'augmentation de la force d'adhésion[34]. Cependant, il est complexe d'attribuer exclusivement à l'ancrage mécanique la responsabilité des liaisons plus fortes, car d'autres mécanismes peuvent également être impliqués lors de l'augmentation de la surface de contact.

Il convient également de noter qu'une étude menée par Allen, qui cherche à établir un lien entre l'intensité et la durabilité des liaisons avec l'augmentation de la rugosité de surface, a montré que la rugosité peut en réalité réduire l'adhérence mécanique.

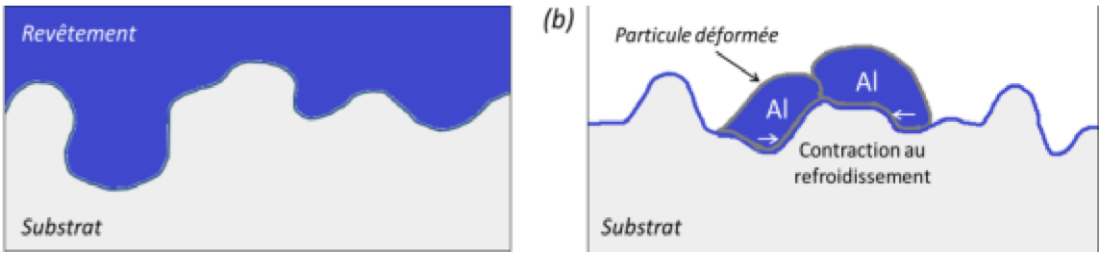


Figure I.4 Illustration de l‟accrochage mécanique du fait (a) de la morphologie du substrat et (b) des déformations plastiques de la particule et du substrat

I.5.2. Théorie de la diffusion

La théorie de la diffusion établit une relation linéaire entre le flux de diffusion et le gradient de concentration. Elle implique un coefficient de diffusion qui varie en fonction de la température, de la pression isostatique et de la contrainte exercée à l'interface. Dans le cas du procédé de projection par gaz froid (cold spray), la diffusion sous contrainte par déformation plastique entraîne une augmentation de la vitesse de diffusion.

Les travaux de Serge Guetta[32] ont mis en évidence les phénomènes de diffusion dans le procédé cold spray. Lorsque la particule entre en contact avec le substrat, en plus de l'ancrage mécanique mentionné précédemment, une diffusion atomique se produit. Dans le processus de projection dynamique par gaz froid, les particules atteignent la surface de la cible à l'état solide. Cependant, l'énergie libérée par les vitesses élevées atteintes par les particules peut éventuellement entraîner une fusion locale lors de l'impact. Une augmentation de la température est alors observée[35], ce qui suggère une diffusion à l'état liquide. La présence d'une zone de transition ou d'une interface plus ou moins épaisse entre les deux matériaux à assembler est le signe d'une diffusion dans le matériau.

Basée sur la loi de Fick, la diffusion peut se produire à l'état solide et à l'état liquide. Dans les deux cas, le temps joue un rôle important et la diffusion est thermodynamiquement activée.

I.6. Préparation de surface, rugosité et adhésion

La préparation ou le traitement de surface vise à modifier la surface d'un matériau par le biais de nettoyages simples ou de traitements chimiques et/ou physiques. Dans le cas des surfaces métalliques, il est courant de trouver des couches d'oxydes qui rendent la surface polaire, c'est-à-dire qu'elle acquiert une charge électrique. La préparation de surface des métaux a pour objectif d'améliorer leurs liaisons mécaniques, notamment lorsqu'ils sont exposés à l'humidité[29].

Les principales raisons qui motivent la préparation de surface sont les suivantes :

Prévenir la formation d'une couche superficielle fragile superficiel créer une topographie spécifique et d'optimiser les forces d'adhésion à l'interface.

I.7. Quantification de l’adhérence des revêtements

Il existe environ une centaine d'essais différents permettant de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. Ces essais peuvent être regroupés en quatre catégories principales [35, 32, 36]:

- Essais de rupture interfaciale : Ces essais mesurent l'énergie nécessaire pour propager une fissure à l'interface entre le revêtement et le substrat. Parmi ces essais, on trouve le test de pelage [37] et l'indentation interfaciale [38].
- Méthodes directes : Ces méthodes consistent à appliquer une contrainte d'adhérence qui provoque la décohésion du revêtement. Les essais de traction [39] et de cisaillement [40] font partie de cette catégorie.
- Méthodes indirectes : Ces méthodes induisent des champs de contraintes complexes dans les matériaux et nécessitent souvent une simulation numérique des phénomènes de l'essai pour obtenir une valeur d'adhérence (contrainte ou énergie). Les essais de rayure [41] et de choc laser [42] font partie de cette catégorie.
- Méthodes non mécaniques : Ces méthodes n'utilisent pas de forces mécaniques pour évaluer l'adhérence. Elles font appel à des techniques telles que les ultrasons ou les émissions thermo-acoustiques [43] [44].

Choisir le bon essai pour déterminer l'adhérence d'un revêtement est complexe et dépend principalement du comportement du matériau à révéler. En effet, certains

essais sont quasi statiques tandis que d'autres sont dynamiques, ce qui influence la réponse du matériau. La sélection de l'essai approprié nécessite donc une compréhension approfondie des propriétés du matériau et des conditions d'application du revêtement.

I.8. Construction d'un dépôt projeté plasma

Un dépôt plasma est formé par l'empilement de lamelles résultant de l'étalement et de la solidification rapide des particules de poudre fondues et accélérées par le plasma. L'étape d'étalement des particules sur le substrat et sur les lamelles précédentes est cruciale dans le processus de projection plasma. La morphologie de chaque lamelle, également appelée "splat" en anglais, joue un rôle déterminant dans la qualité du dépôt, notamment en ce qui concerne son adhérence et ses autres propriétés.

La manière dont les gouttelettes se propagent et se solidifient influence la porosité du dépôt ainsi que la rugosité finale de sa surface. Les lamelles ont généralement une épaisseur comprise entre 1 et quelques microns, avec des diamètres variant entre 50 et 100 μm. La structure du dépôt dépend donc des paramètres des particules lors de l'impact (vitesse, température, taille), ainsi que des paramètres liés au substrat (nature, rugosité, température de préchauffage, chimie de surface).

L'empilement des lamelles confère aux dépôts une structure lamellaire particulière, anisotrope et hétérogène, avec des lamelles individuelles. Cependant, ce mode de construction peut générer des défauts tels que des pores, des fissures inter lamellaires (macrofissuration), des fissures intra lamellaires (microfissuration), des zones de contact plus ou moins parfaites entre les lamelles et entre les lamelles et le substrat, ainsi qu'une rugosité de surface. La présence de ces défauts peut avoir des conséquences néfastes sur les propriétés d'utilisation du dépôt.

Lors de la projection en atmosphère réactive, des phases telles que des oxydes, des nitrures, etc., peuvent se former in situ au cours du processus de projection. La microstructure lamellaire des dépôts est schématiquement représentée dans la Figure 1.5 (non fournie dans la question).

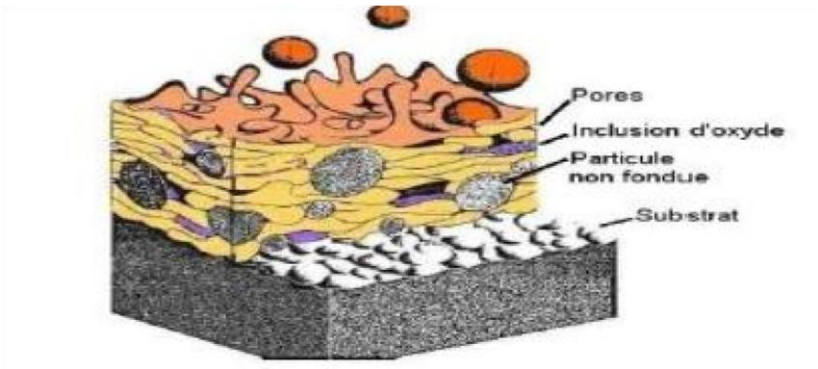


Figure 1.5 Représentation Schématique de L'empilement des Lamelles Lord La Projection Plasma d'après [13]

I.9.Détermination des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes qui existent à l'intérieur d'une pièce mécanique en l'absence de toute sollicitation externe. Elles peuvent avoir différentes origines, telles que des traitements mécaniques, thermiques ou chimiques. À l'échelle de la pièce, la somme des contraintes résiduelles est nulle pour maintenir l'équilibre mécanique. Dans le cas des revêtements, ces contraintes résiduelles sont l'une des caractéristiques les plus importantes, car elles peuvent avoir un impact catastrophique sur la qualité de l'adhérence, la résistance à la fissuration, la résistance aux chocs thermiques, la durée de vie sous cyclage thermique, la résistance à l'érosion, et d'autres propriétés.

Pour évaluer les contraintes résiduelles, il existe deux grandes catégories de méthodes expérimentales :

Les méthodes non destructives : Ces méthodes permettent de mesurer les contraintes résiduelles sans endommager la pièce ou le revêtement. Elles comprennent des techniques telles que la diffraction des rayons X, la méthode des ultrasons, la méthode de la photoélasticité, la méthode de l'indentation, la méthode de la corrélation d'images, etc. Ces techniques fournissent des informations sur les contraintes à différentes profondeurs ou sur la distribution des contraintes à la surface ou à l'intérieur du matériau.

Les méthodes destructives : Ces méthodes impliquent la destruction partielle ou totale de l'échantillon pour mesurer les contraintes résiduelles. Elles peuvent inclure des techniques telles que la méthode de la sectionnement, la méthode de la relaxation des contraintes, la méthode de l'anneau fendu, etc. Ces techniques permettent d'obtenir des mesures directes des contraintes résiduelles, mais elles nécessitent souvent la préparation d'échantillons spécifiques et peuvent endommager la pièce ou le revêtement.

Le choix de la méthode dépend des objectifs de l'évaluation des contraintes résiduelles, des contraintes d'accès à la pièce ou au revêtement, ainsi que des contraintes de temps, de coût et de disponibilité des équipements nécessaires.

I.9.1. Genèse des contraintes résiduelles

projeté thermiquement subit généralement un refroidissement rapide lors de sa formation, ce qui peut entraîner des contraintes de traction dans le matériau. Ces contraintes de traction sont causées par le rétrécissement des particules individuelles pendant le refroidissement.

Lorsque les particules sont projetées et déposées dans un état fondu, leur refroidissement entraîne une contraction, ce qui crée des contraintes de traction dans le revêtement. Ces contraintes de traction peuvent être plus facilement observées lorsque le revêtement est projeté sur une surface mince et plate.

D'un autre côté, les contraintes de compression peuvent également se développer dans les revêtements projetés thermiquement. Cela peut être dû à des différences de coefficient de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat, ce qui entraîne une compression du revêtement lors du refroidissement. Les contraintes de compression peuvent également se former en raison de la contrainte de confinement exercée par le substrat sur le revêtement.

La présence de ces contraintes résiduelles peut influencer les performances du revêtement. Par exemple, des contraintes de traction excessives peuvent favoriser la fissuration du revêtement, réduisant ainsi sa durabilité et sa résistance à l'usure. D'autre part, des contraintes de compression peuvent améliorer l'adhérence du revêtement au substrat.

La maîtrise et la gestion des contraintes résiduelles dans les revêtements projetés thermiquement sont donc des aspects importants pour assurer la qualité et la performance du revêtement dans son application finale. Des techniques de mesure et de contrôle des contraintes résiduelles sont utilisées pour optimiser les paramètres du procédé de projection thermique et minimiser les effets indésirables des contraintes résiduelles.

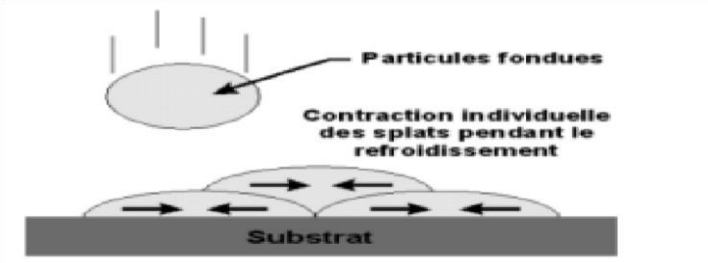


FIGURE 1.6 foramation des contraintes résidualles de traction [84]

Effectivement, les contraintes résiduelles dans les revêtements projetés thermiquement peuvent être de traction ou de compression, et elles sont influencées par différents facteurs.

Les contraintes résiduelles de traction se produisent en raison du rétrécissement des particules pendant le refroidissement. Lorsque le revêtement est projeté sur un substrat rigide et épais, le substrat ne se fléchit pas, ce qui entraîne des contraintes élevées dans le revêtement et à l'interface substrat/revêtement. Les matériaux ayant un coefficient de dilatation thermique élevé auront tendance à se rétrécir davantage, générant ainsi des niveaux plus élevés de contraintes résiduelles de traction. Ces contraintes de traction élevées peuvent provoquer des fissures si elles dépassent la résistance à la traction du revêtement.

D'autre part, les contraintes résiduelles de compression sont générées lorsque les particules solides ou semi-solides de revêtement entrent en impact avec le substrat. Ces particules non fondues poussent et déforment le matériau du substrat, créant ainsi des contraintes de compression. Les particules plus froides et plus solides produiront des niveaux plus élevés de contraintes résiduelles de compression. Un revêtement présentant des contraintes résiduelles de compression fléchira un panneau

mince dans la direction opposée à la torche de projection, ce qui donnera une forme convexe au panneau.

Les contraintes de compression peuvent également influencer l'adhérence entre le revêtement et le substrat, ainsi que générer des contraintes de cisaillement à l'interface. Des niveaux élevés de contraintes de compression peuvent améliorer l'adhérence du revêtement au substrat, mais il est important de veiller à ne pas dépasser les limites de résistance du matériau.

La compréhension et la maîtrise de ces contraintes résiduelles sont essentielles pour garantir la qualité et les performances des revêtements projetés thermiquement. Des techniques de mesure et de contrôle des contraintes résiduelles sont utilisées pour optimiser les paramètres du procédé de projection et minimiser les effets indésirables des contraintes résiduelles sur les propriétés du revêtement.

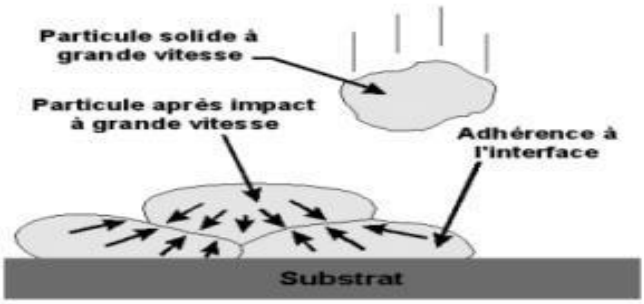


Figure 1.7 Formation Des Contraintes Résiduelles De Compression [84]

Le test d'Almen, également connu sous le nom de test Almen strip, est en effet utilisé pour évaluer les contraintes résiduelles dans les revêtements projetés thermiquement. Il s'agit d'un test qui mesure le taux d'écrouissage résultant du grenaillage.

Dans le test d'Almen strip, une bande mince en acier à ressort est soumise à un processus de grenaillage. La déformation résiduelle induite par ce traitement est mesurée au centre de la bande avant et après la projection du revêtement d'épaisseur connue. La différence entre les deux mesures permet de quantifier le niveau de contraintes résiduelles. Plus la bande est fléchie, plus le niveau de contraintes est élevé.

Il est important de noter que le test d'Almen prend en compte la modification de la résistance de l'acier due à la production de chaleur pendant la pulvérisation. Ainsi, la déformation de la bande est influencée par la quantité de chaleur présente et donc par la température atteinte par le substrat. Pour les revêtements projetés thermiquement, il est possible de modifier le test d'Almen en utilisant un substrat qui n'est pas affecté par la chaleur, comme un acier inoxydable austénitique, un alliage Inconel™ ou un acier recuit à basse teneur en carbone.

Cela permet de se concentrer sur l'évaluation des contraintes résiduelles spécifiquement liées au processus de projection thermique, en minimisant l'effet de la chaleur sur la déformation de la bande. Ainsi, le test d'Almen peut être adapté pour mesurer les contraintes résiduelles dans les revêtements projetés thermiquement en utilisant des substrats appropriés.

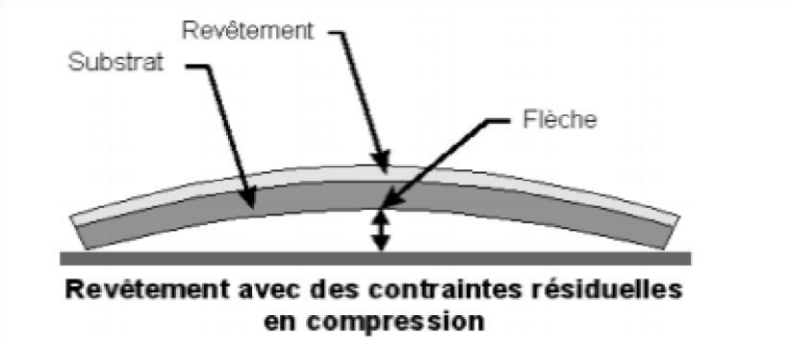


Figure 1.8 Test d'Almen ("Almen strip test") [84]

Effectivement, les contraintes de cisaillement peuvent se former à l'interface entre le substrat et le revêtement projeté thermiquement. Elles résultent des contraintes résiduelles préexistantes, qu'elles soient de compression ou de traction. Les contraintes de cisaillement sont des contraintes parallèles à l'interface entre le revêtement et le substrat.

Ces contraintes de cisaillement peuvent avoir un impact significatif sur l'adhérence du revêtement et contribuer au délaminage de l'interface. Lorsque les contraintes de cisaillement dépassent la résistance de liaison entre le revêtement et le substrat, cela peut entraîner un décollement ou un délaminage du revêtement.

Il est donc important de prendre en compte les contraintes de cisaillement lors de l'évaluation de l'adhérence et de la durabilité des revêtements projetés

thermiquement. Des contraintes de cisaillement élevées peuvent nécessiter des mesures supplémentaires pour renforcer l'interface et améliorer l'adhérence du revêtement.

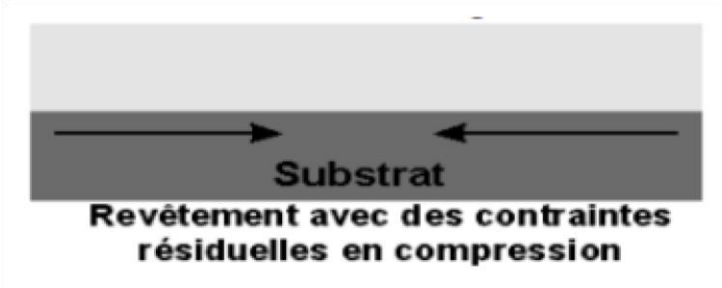


Figure 1.9 Représentation Des Contraintes Résiduelles De Cisaillement [84]

Effectivement, la température du substrat pendant la projection des revêtements projetés thermiquement peut influencer les contraintes résiduelles résultantes. Si le substrat est froid au moment du dépôt d'un matériau ayant un fort taux de rétrécissement, le revêtement se contractera davantage que le substrat, ce qui entraînera un taux élevé de contraintes. Cela peut conduire à des contraintes résiduelles élevées dans le revêtement lui-même et à l'interface avec le substrat.

Cependant, si le substrat est préchauffé avant le dépôt, il se dilatera. Dans ce cas, le revêtement sera appliqué sur un substrat qui est déjà dans un état dilaté. Lors du refroidissement ultérieur, à la fois le substrat et le revêtement se contracteront simultanément, réduisant ainsi les contraintes dans le dépôt. Cette dilatation préalable du substrat permet de compenser partiellement la contraction du revêtement, réduisant ainsi les contraintes résiduelles.

Il est donc courant de préchauffer le substrat avant la projection pour minimiser les contraintes résiduelles dans le revêtement et améliorer l'adhérence du revêtement au substrat. Le contrôle de la température du substrat est donc un facteur important dans le processus de projection thermique pour obtenir des revêtements de qualité avec des contraintes résiduelles maîtrisées.

I.10.Domain d'utilisation

Effectivement, la projection thermique trouve des applications dans de nombreux secteurs d'activité. Bien que la protection anticorrosion soit l'une des applications les plus courantes, d'autres secteurs tels que l'automobile utilisent la

projection thermique pour diverses applications. Parmi les exemples spécifiques dans l'automobile, on peut citer les soupapes, les segments de piston, les anneaux de synchroniseur, les disques d'embrayage, les cylindres, les pompes, les platines d'alternateurs et les plaquettes de freins.

Les domaines d'application des revêtements projetés par plasma continuent de s'étendre, notamment avec le développement de matériaux composites futuristes tels que les revêtements métalliques sur des pièces en polymères.

Un exemple marquant de l'application de la projection plasma est la fabrication de sondes à oxygène pour les pots catalytiques. Rien que pour cette application, environ 130 tonnes de spinelles ont été utilisées dans le monde en 1997. La technique de projection plasma offre une large gamme de matériaux d'apport, ce qui lui permet d'intervenir dans de nombreux cas d'application variés.

En résumé, la projection thermique joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs, offrant des solutions de revêtement et de protection dans des applications diverses et variées.

I.10.1. Protection contre la corrosion

La corrosion altère les surfaces métalliques en environnements agressifs. La projection thermique joue un rôle essentiel dans la protection des métaux, notamment des aciers, contre la corrosion sèche et humide. Les revêtements projetés thermiquement agissent comme une barrière protectrice, prolongeant la durée de vie des pièces métalliques et préservant leur intégrité structurelle.

I.10.2. Corrosion sèche

La corrosion est une attaque chimique qui peut être contrée par la projection thermique. Les dépôts d'alliages auto-fusibles (Ni, Cr, B, Si) offrent une étanchéité grâce à la refusion, tandis que d'autres dépôts peuvent être rendus étanches par des traitements thermiques, mécaniques, chimiques, ou l'application de peintures ou de résines. Par exemple, le traitement thermique d'une couche d'aluminium sur de l'acier permet la formation d'aluminures de fer résistants à l'oxydation. Des traitements mécaniques tels que l'usinage ou le compactage peuvent également renforcer les revêtements métalliques.

I.10.3. Corrosions humides

En présence d'un milieu humide, des différences de potentiel peuvent se former entre le métal et son oxyde, entre différentes zones oxygénées ou entre différents métaux d'un assemblage, conduisant à la formation d'une pile et à la corrosion de l'anode. Pour prévenir ce type de corrosion, on applique des revêtements de métaux plus anodiques sur les surfaces métalliques à protéger. Le zinc et l'aluminium sont les plus couramment utilisés pour l'acier, et un alliage mixte (85Zn-15Al) permet de bénéficier des avantages des deux métaux.

I.10.4. Protections contre l'usure

L'usure des surfaces métalliques se produit lorsque le matériau est soumis à des forces de frottement, entraînant une perte progressive de matière à la surface. Cette usure est préjudiciable, sauf pendant le rodage, et limite la durée de fonctionnement des machines. Elle ne dépend pas seulement de facteurs tels que la lubrification, la pression et la vitesse, mais aussi de nombreux autres éléments tels que la technologie utilisée, la métallurgie des pièces, les traitements de surface, les tolérances de fabrication et les conditions environnementales telles que la température, la corrosivité, l'humidité et l'abrasivité. La projection thermique offre souvent des solutions à ce problème dans différents assemblages mécaniques. Les revêtements sont sélectionnés en fonction de leur nature, de leur dureté et de leurs qualités de surface, qu'elles soient brutes de dépôt ou usinées. Le choix est principalement basé sur l'analyse de la cause de l'usure.

I.10.5. Usure par corrosion

L'usure peut se produire lorsque des particules sont projetées à grande vitesse sur une surface par un fluide liquide ou gazeux. Dans ce cas, des matériaux très durs ou très tendres peuvent offrir des solutions. Les matériaux très durs sont les mêmes que ceux mentionnés précédemment, tandis que les matériaux très tendres, tels que le plomb, peuvent également être utilisés.

I.10.6. Usure par adhésion

L'usure par adhésion est le type d'usure le plus fréquent. Elle est causée par le cisaillement dû au frottement des micro-soudures ou des jonctions formées entre

deux aspérités en contact direct métal/métal. Lorsque les deux surfaces sont en mouvement relatif, l'énergie thermique dissipée par le frottement, combinée aux fortes pressions ponctuelles, peut entraîner un écoulement plastique localisé du métal et la soudure des aspérités en contact. Les deux surfaces nues adhèrent soit par solubilité et diffusion (soudure chaude), soit par adsorption solide (soudure froide).

I.10.7. Application aéronautiques

Dans les moteurs à turbine d'avion, la projection thermique, en particulier la projection par torche plasma, est largement utilisée pour de nombreuses pièces, telles que :

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

Conclusion

Cette étude bibliographique sur la formation des dépôts par projection plasma met en évidence leurs applications et les axes de développement. La réalisation de dépôts à partir de poudre montre une forte interaction entre les particules et le substrat lors de l'étalement et la formation des lamelles, nécessitant des méthodes expérimentales ou numériques plus puissantes pour suivre en continu l'interface particule-substrat. Notre travail se concentrera sur la compréhension et le contrôle des mécanismes impliqués dans l'étalement par simulation numérique, en étudiant le comportement thermomécanique des particules lors de leur étalement sur le substrat dans différentes conditions. Ces paramètres seront corrélés à la croissance des dépôts et à leurs propriétés.

CHAPITRE II : FORMULATION MATHÉMATIQUE

II.1. Introduction :

Dans cette partie, nous aborderons les équations et les méthodes numériques qui permettent d'expliquer le phénomène physique de l'étalement des particules avec solidification sur un substrat. La résolution d'un problème de simulation numérique de l'impact d'une goutte sur un substrat nécessite la résolution d'équations mathématiques, notamment dans les domaines thermique et dynamique.

II.2. écoulements bi phasiques :

Les écoulements bi phasiques peuvent être classés selon les phases en présence (liquide, solide, ou gaz) ou selon la distribution spatiale des interfaces.

Pour le premier cas, les combinaisons possibles sont les suivantes :

- mélange de deux liquides non miscibles (échangeurs à contact direct).
- mélange gaz-solide (transport pneumatique du blé, fumées, poussières).
- mélange solide -liquide (transport de boue).
- mélange gaz-liquide (extraction pétrolière.

Concernant le second cas, on distingue les écoulements suivants :

- à phase dispersées.
- à phase séparées.
- de transition.

II.2.1.Modélisation bi phasique liquide/solide : [57]

On considère un domaine Ω constitué de deux de phases, l'une liquide, l'autre solide, occupant respectivement les sous-domaines Ω_l et Ω_s On suppose le milieu saturé ce qui implique que seules ces deux phases sont présentes. Suivant le cadre de la théorie des mélanges, on introduit la fraction volumique de la phase liquide α définie par :

$$\boldsymbol{ai = aETas = 1 - a}$$

Dans le cadre général d'un problème faisant intervenir deux phases, un liquide et un solide, notre objectif est de parvenir à un modèle unique capable de traiter les trois configurations types illustrées figure (II.1).

La principale différence entre ces trois problèmes est la définition Du paramètre aqui peut être constant (modèle statique et homogène), fonction uniquement de l'espace (problème statique) oufonction de l'espace et du temps (problème dynamique).

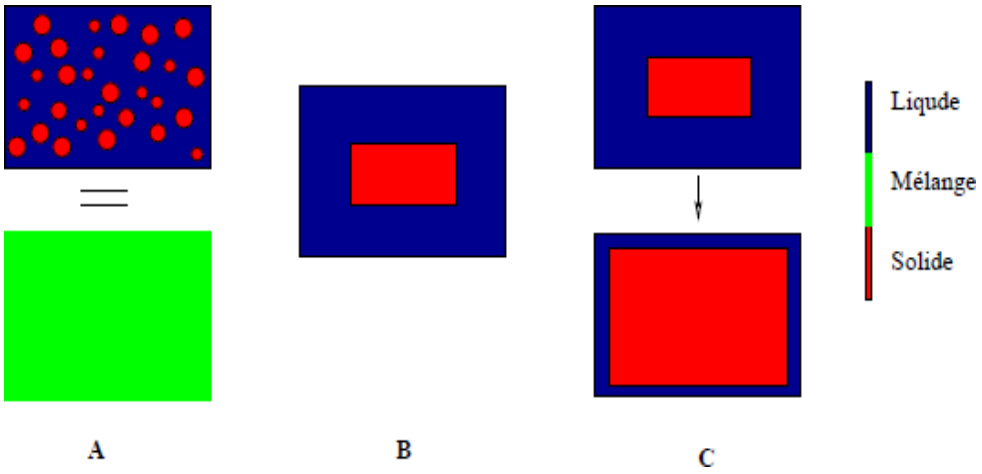


Figure II.1 : Répartition des phases pour trois problèmes bi phasiques types (A :Mélange homogène; B :Répartition statique des phases ; C : Problème dynamique de type changement de phase.)

II.3. Model dynamique :

Le mouvement d'un fluide est modélisé par les équations de Navier-Stokes qui permet de traiter les fluides classiques comme l'air, l'eau, l'huile ou aussi les métaux fondus. Les équations gouvernantes sont :

- la conservation de la masse ou l'équation de continuité.
- la conservation de la quantité de mouvement.
- la conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique).

La formulation mathématique des lois de la conservation régissant les phénomènes physiques commeles écoulements de fluides **[58]**.

II.3.1.1 Modélisation de L'écoulement des Fluides :

Tous les problèmes de CFD sont bases sur les lois fondamentales de mécanique des fluides ; qui sont ***:***

II.3.1.1 L'équation de continuité :

Cette équation concerne le principe de conservation de la masse dans un élément. Elle Exprime l'égalité de la variation de la masse d'élément et de la déférence entre la quantité de Fluide qui entre la quantité de fluide pendant le même temps.

- L'équation de continuité globale est donnée par :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\vec{\nabla}\vec{V}=0 \qquad \textbf{Avec :} \left(\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V^p.\nabla^p\right)$$

Dans un régime permanent on a donc :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

II.3.1.2L'équation de quantité de mouvement :

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, le mouvement d'air dans les locaux et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et George Stokes.

$$\rho\left\{\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \vec{v}\nabla\vec{v}\right\} = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{g}$$

Où :

ρ : La densité considérée variable avec le temps.

μ : La viscosité dynamique aussi variable.

P : la pression.

$\vec{g}$: la gravité.**[59]**

III.3.1.2Équation de l'énergie

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}\cdot\nabla T\right) = k\nabla^2 T + q$$

$$D = \frac{k}{\rho c}$$

T : température.

q : source volumique. **[58]**

II.4. Modèle thermique

Les modèles de transfert thermique unidimensionnel couplés aux modèles qui décrivent l'étalement de la matière sur le substrat traite le refroidissement et la solidification des lamelles comme un problème uniquement thermique. Ce sont des modèles simples comparés

aux modèles de l'écoulement de la phase fluide comme ceux développés par Mostaghimi et Al qui traite la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leur morphologie, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière . **[59]**

Ce paragraphe traite des modèles physiques essentiels pour étudier le phénomène complexe de l'étalement et de la solidification de particules, qu'elles soient métalliques ou céramiques, lors d'un procédé de projection thermique.

II.3.1.1 Transfert de chaleur avec changement de phase

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) **[60].** C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré comme une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan **[61].** En général ces méthodes cherchent à approcher la position du front de solidification/fusion au cours du temps, et se divisent alors en deux catégories principales:

- les méthode sà grille mobile ou déformable : aussi appelées méthodes de suivi de front (front tracking).

Les méthodes à grille spatiale fixe : qui regroupent par exemple la méthode de la chaleur spécifique équivalente, la méthode de la source de chaleur fictive et la méthode d'enthalpie.

II.4.1.1. Méthode à grille mobile

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de lamanière suivante **[62]** :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

$$\boldsymbol{\rho_1 c_{p1} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda_1 \nabla T) = 0}$$

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

$$\boldsymbol{\rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T) = 0}$$

A l'interface liquide-solide $\boldsymbol{\Gamma(x,t)}$:

$$\boldsymbol{\rho L_f \vartheta_n = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n}}$$

Dans les équations ci- dessus, n représente la normale à l'interface $\boldsymbol{\Gamma(x,t) = 0}$
$\boldsymbol{\vartheta_n}$La composante normale de la vitesse de déplacement de l'interface liquide/solide.

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif, le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier **[62]**.

Dans le cadre de résolution des problèmes de fusion/solidification, ces méthodes ne s'appliquent qu'aux cas de changement de phase isotherme (corps purs) dans le cas contraire (aciers, alliages)l'interface solide-liquide n'est pas une surface de discontinuité franche, mais s'apparente alors, à l'échelle macroscopique, à une zone pâteuse les phases liquide et solide, dans ce cas, les méthodes à maillage fixe sont préférables.

II.4.1.2.a Méthode à grille fixe

Les méthodes à grille (maillage) fixe sont ondées sur une formulation d'enthalpie de l'équation de conservation de l'énergie, et utilisent la fraction liquide locale pour suivre le déplacement du front de solidification à travers le maillage statique.

III.4.1.2.a Méthode d'enthalpie :

La méthode d'enthalpie à maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide. Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et al **[63].** Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'àaujourd'hui **[64].**

L'équation d'énergie est écrite à la fois dans la phase liquide et la phase solide, et pour déterminer la progression de l'interface Γ, le modèle de conduction prend en compte la chaleur latente. Cette formulation requiert un algorithme de suivi du front particulièrement fin. La fonction d'enthalpie massique $H(T)$ est introduite (figure II.2) elle inclut la chaleur latente par unité de masse L_f et est définie comme suit :

$$\boldsymbol{H(T) = \int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T} c_p(T)dT + \mathrm{f_l} L_l}$$

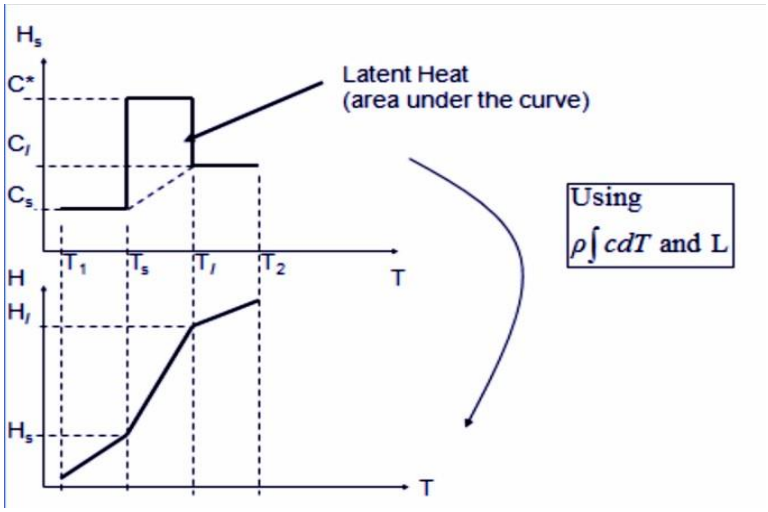


figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température

La conservation de l'énergies exprime alors :

$$\boldsymbol{\rho \frac{\partial (\mathbf{H})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{H} \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q}$$

Qu'on peut réécrire, en utilisant la conservation de la masse, sous forme :

$$\boldsymbol{\rho \frac{\partial (H)}{\partial t} + \rho v \cdot \nabla \cdot H = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q}$$

Et en fonction de la température

$$\boldsymbol{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p v \cdot \nabla \cdot T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q + \rho L_f \frac{df_s}{dt}}$$

II.4.1.2.b Méthode de la chaleur spécifique équivalente :

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique c_p **[65]**. Ainsi, si le chemin de Solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleurspécifique équivalente :

$$\boldsymbol{\frac{\partial \rho H}{\partial t} = \rho c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L_f \frac{df_s}{dT} \frac{dT}{dt} = \rho c_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t}}$$

La chaleur spécifique équivalente c_p^{eq} est ainsi définie :

$$\boldsymbol{\rho c_p^{eq} = \rho c_p - \rho L_f \frac{df_s}{dT}}$$

Cette méthode permet d'exprimer le problème thermique en température, en résolvant :

$$\rho c_p^{eq} \frac{\partial(T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q$$

Le changement de phase est alors traité comme un non linéarité des propriétés Physiques.

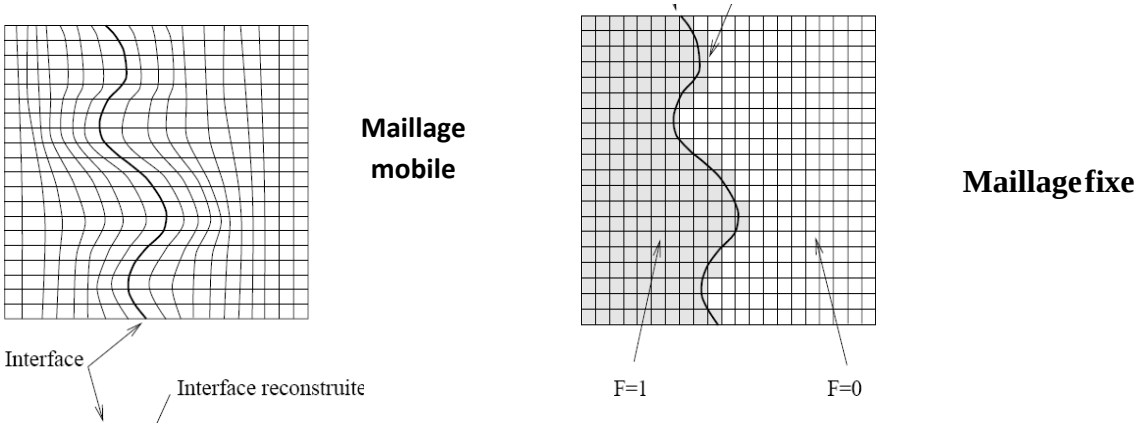
II.4.2.Modèle thermique utilisé

Le modèle de transferts thermiques que nous avons adopté est basé sur une formulation à chaleur spécifique équivalente, d'un fluide en mouvement qui va permettre donc de contrôler les conversions d'énergie dans le système. Le modèle de transferts thermiques à chaleur spécifique équivalente convient particulièrement bien aux modèles à domaines fixes, puisqu'elles ne nécessitent pas d'imposer explicitement la condition de changement de phase à l'interface solide/liquide. D'autre part, c'est aussi la formulation la plus adaptée à la résolution numérique des problèmes à changement de phase an isotherme.

$$\rho c_p^{ea} \left[\frac{\partial(T)}{\partial t} + (V \cdot \nabla)T\right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q$$

II.5Calcul d'interfaces :

Les techniques de calcul d'interfaces peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles (figure II.3) en fonction de maillage que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).



A) Méthode lagrangienne **B)** Méthode eulérienne

Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface **[66].**

II.5.1.La méthode lagrangienne :

Consiste à discrétiser un seul des deux fluides en présence, et considérer l'interface des deux fluides comme condition limite du problème. Les équations de Navier-Stokes dans ce domaine permettent le mouvement de ce milieu sans prendre en compte l'autre fluide. Cela nécessite un maillage adaptif qui suit les déformations de l'interface .l'intérêt de ce type de méthode est de fournir avec précision l'évolution de la surface libre en fonction du temps et grâce à un maillage évolutif, de raffiner localement pour améliorer la précision des phénomènes liés à l'interface. Les inconvénients de cette méthodologie résident dans le coût et le temps de calcul nécessaire à la reconstruction de l'interface et des conditions limites du système à chaque pas de temps .de plus, cette méthodologie n'est pas bien adaptée aux problèmes de rupture de fluide que l'on rencontre par exemple lors du splash qui génère des gouttes secondaires.

II.5.2.La méthode eulérienne :

Elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Lesconditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides.

l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première **[67]** ; cependant de par sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce àl'équation couleur.

Dans ces méthodes, une fonction de présence permet de localiser la présence de volume. L'interface est alors reconstruite à partir de chargement des propriétés physiques. Les méthodeseulériennes peuvent être classées en deux catégories :

- Les méthodes de suivi de front.
- Les méthodes de suivi de volume.

II.5.2.1. Les méthodes de suivi de front :

Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface
b) Fonction de hauteur

c) Méthode de ligne de niveau (level set)

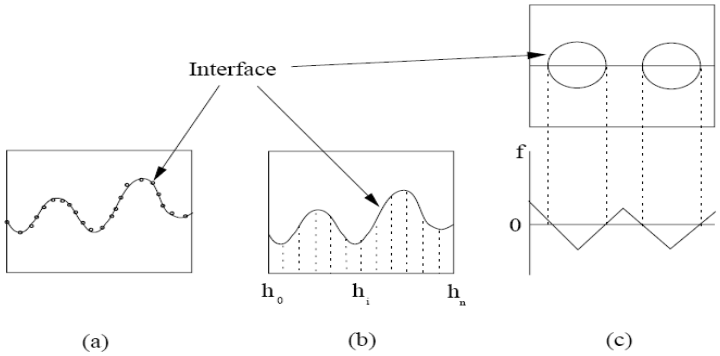


Figure II.4: Différentes méthodes de suivi de front

a) marqueur de surface.

b) fonction de hauteur.

c) méthode de ligne de niveau **[69].**

II.5.2.2. Les méthodes de suivi de volume :

Dans les méthodes de suivi de volume, le fluide est utilisé comme marqueur en utilisant une fonction de présence. C'est là que se situe le principal défaut de ces méthodes car la position de l'interface n'estpas connue explicitement.

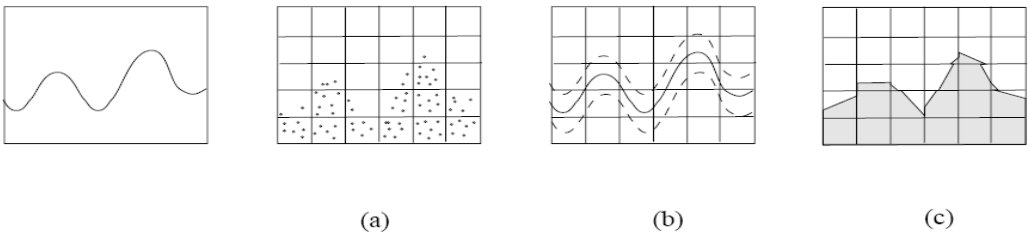


Figure II.5: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque **[69,70].**

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

On utilise pour la méthode VOF (volume of fluide) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur de zéro. Si la valeur de la fraction volumique est

comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide (figureII.6)

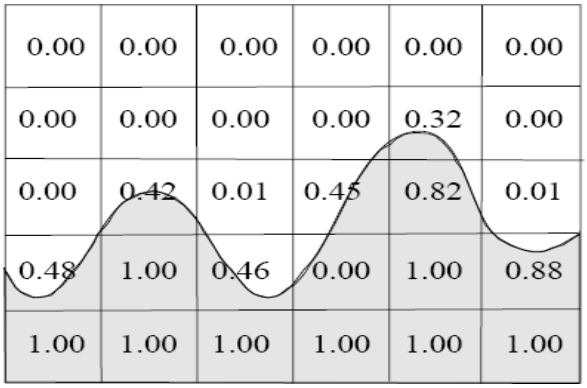


Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret **[71].**

II.5.3.La Méthode VOF

On utilise la méthode VOF qui est une méthode de construction de l'interface affine par morceaux. VOF se décompose en trois parties : on doit tout d'abord reconstruire la représentation de la surface libre à partir de la fraction volumique ensuite on transporte l'interface à l'aide d'une méthode lagrangienne et enfin on calcule le nouveau champ de fraction volumique. L'interface est alors approchée par un segment en 2D comme on peut le voir sur la (figure II.7). La force de la méthode VOF est la reconstruction de l'interface qui se fait en fonction de son orientation et de la fraction volumique. Ainsi ; par rapport à des méthodes qui utilisent des schémas de discrétisation (schémas UPWIND, QUICK, TVD.), on élimine totalement le phénomène de diffusion numérique, et par rapport à d'autres méthodes VOF (VOF SLIC) on suit l'interface de façon plus précise.

Donc, dans la méthode VOF, à chaque pas de temps, à partir de la fraction volumique du fluide que l'on cherche à advecter et d'un calcule de vecteur normal à l'interface, on reconstruit précisément l'interface. Cette surface plane est advectée par le champ de vitesse imposé à l'interface et le résultat utilisé pour calculer la nouvelle fraction volumique. Après on passe au pas de temps suivant. On détaille maintenant ces étapes en 2D.

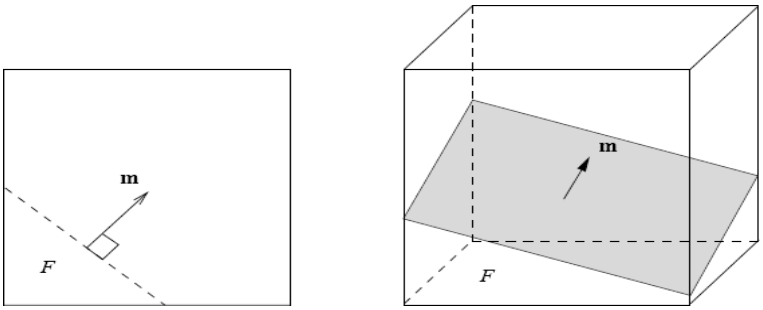


Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique **[72].**

Finalement, le système d'équation du problème couplé à résoudre par la méthode eulérienne est lesuivant :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \dfrac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = 0 \\ \rho \left[\dfrac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) \right] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot (\mu [\nabla \mathbf{u} + \nabla^{\mathbf{T}} \mathbf{u}]) - \sigma \nabla \left[\dfrac{\nabla C}{\| \nabla C \|} \right] \cdot \dfrac{\nabla C}{\| \nabla C \|} \\ \rho c_p^{ea} \left[\dfrac{\partial (T)}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \end{cases}$$

Dans le modèle présent, à chaque pas de temps, les caractéristiques physiques des matériaux (conductivité thermique et chaleur spécifique) mais la viscosité dynamique et la densité sont des constantes, par le recalcule en fonction de la température, ainsi que la position spatiale par la fonction couleur :

$$\mathbf{Var_i} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Var_{goutte}} + (\mathbf{1} - \boldsymbol{C}) \cdot \mathbf{Var_{air}}$$

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc

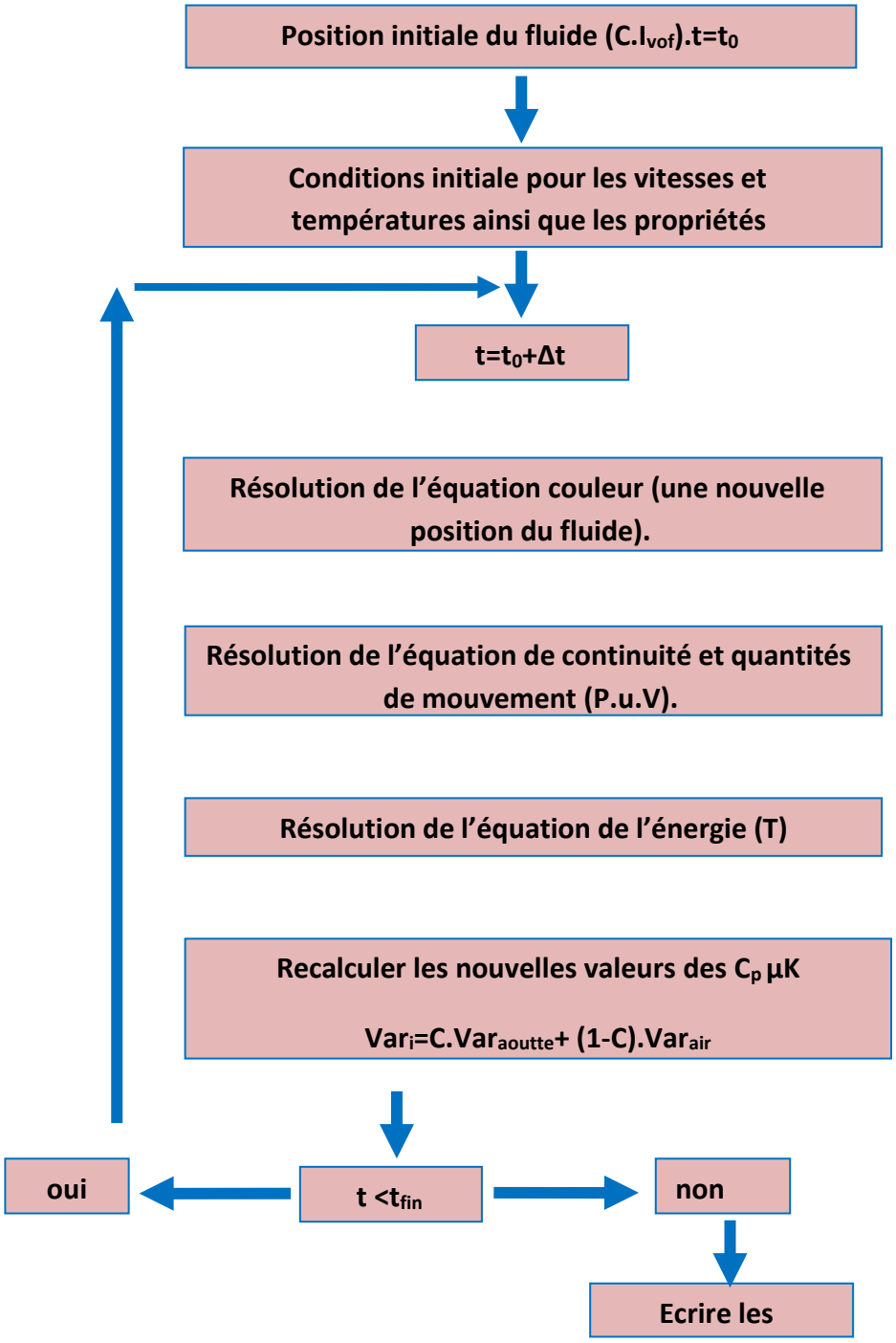


Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temp

II.6. Conclusion :

À la conclusion de ce chapitre, nous avons résumé les méthodes numériques employées dans le traitement des problèmes thermiques et dynamiques. Nous avons également présenté la méthode de volume de fluide (VOF) que nous utilisons pour simuler le transport de l'interface, ainsi que les modèles de contrôle de la solidification.

CHAPITRE III : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

III.Introduction

Les techniques de simulation se développent considérablement, remplaçant progressivement les méthodes expérimentales coûteuses. Les impératifs industriels de rapidité et de réduction des coûts sont responsables de cette évolution. Les approches actuelles intègrent les phénomènes dynamiques et thermiques dans tous les domaines.

III.1. Résolution numérique :

Lors de l'impact d'une goutte sur un substrat sec, différents mécanismes influent sur la dynamique de l'étalement, conduisant à des régimes variés tels que l'étalement simple, les rebonds ou l'éclatement. L'introduction du transfert de chaleur et du processus de solidification rend le problème plus complexe, avec une augmentation significative des paramètres. Les modèles de solidification existants ne prennent pas en compte les conditions de solidification rapide. Le modèle numérique proposé résout les équations de Navier-Stokes avec les conditions d'incompressibilité et la conservation de l'énergie thermique, utilisant une méthode d'éléments finis. L'algorithme du volume de fluide (VOF) est utilisé pour suivre la surface libre du fluide dans un domaine à maillage fixe.

III.2. Discrétisation des équations :

Trois grandes familles de méthodes sont couramment utilisées :

- La méthode des différences finies, qui discrétise les opérateurs différentiels sur une grille avec un pas d'espace fixe en utilisant des développements de Taylor tronqués. Cela permet de résoudre des équations aux dérivées partielles.

$$\partial_t u + \alpha \partial_x u = 0, \quad \alpha > 0$$

Un schéma aux différences finies possibles est

$$\frac{u_j \quad -u_j}{\Delta t} + \alpha \frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} = 0$$

- La méthode des éléments finis, qui divise l'espace en éléments finis et approxime les solutions à l'aide de fonctions de base sur ces éléments. Les opérations différentielles sont transformées en opérations algébriques sur les éléments finis.

$$\partial_t U + \partial_x f(U) + \partial_y g(u) = 0$$

- La méthode des volumes finis, qui discrétise le domaine en volumes finis et approxime les flux à travers les faces des cellules. Les équations de conservation sont intégrées sur chaque cellule en utilisant les valeurs moyennes des variables.

Ces méthodes offrent différentes approches pour résoudre numériquement des problèmes d'équations aux dérivées partielles, chacune ayant ses propres caractéristiques et domaines d'application.

III.3. Résolution des équations par éléments finis :

III.3.1. Méthodes des éléments finis :

La méthode des éléments finis repose sur deux idées principales : la méthode d'interpolation et la méthode variationnelle. Étant donné un domaine continu et une fonction u qui est une solution de l'équation L(u) = 0, les étapes de la méthode sont les suivantes :

a) La méthode d'interpolation permet de construire une fonction proche de u en utilisant un nombre fini de valeurs réelles. Cette fonction approchée est construite à partir d'un ensemble de points dans l'élément considéré.

b) La méthode variationnelle remplace l'équation L(u) = 0 par un nombre fini d'équations. En supposant que la fonction approchée est connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en tout autre point de l'élément par interpolation.

La fonction approchée sur un élément K du maillage, notée ϕ, est généralement exprimée sous une forme spécifique [64]:

$$\phi(x, y) = \sum Ni(x, y)ui$$

où :

Ni(x, y) sont des fonctions de forme qui dépendent des coordonnées locales de l'élément et ui sont les valeurs de la fonction approchée aux nœuds de l'élément.

En résumé, la méthode des éléments finis utilise l'interpolation et la variation pour construire une fonction approchée à partir d'un nombre fini de points, permettant ainsi de résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles sur un maillage discret.

$$\boldsymbol{\partial_t U + \partial_x f(U) + \partial_y g(u) = 0}$$

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‟espaced‟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] :

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

Le choix de l'espace Us pour la fonction u doit être fait avec soin et pertinence.

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] :

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

III.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. $-\boldsymbol{\sigma\nabla}$

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	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu\frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu\frac{\partial V}{\partial y}) - \boldsymbol{\sigma}(\overline{\quad\quad}) \overline{\quad\quad}$
V_y	1	μ	$\frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x}(\mu\frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial V}{\partial y}) - \boldsymbol{\sigma}(\overline{\quad\quad}) \overline{\quad\quad}$
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 des équations aux dérivées partielles en équations algébriques permet de les résoudre numériquement. Le processus de discrétisation par la méthode des éléments finis consiste à écrire l'équation généralisée sous forme matricielle

élémentaire après intégration [65]. Cette forme matricielle est ensuite utilisée dans les méthodes numériques traditionnelles.

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

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] :

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

Avec :

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

Pour le nœud i:

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

La matrice de masse peut être exprimée en fonction des indices inférieurs i et j, représentant le nombre de nœuds, en négligeant la deuxième partie de l'équation (III.14).

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

Si l'approximation localisée de masse est employée.

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

Où :

δij= delta de Kronecker (0 si i ≠ j, 1 si i = j)

Il existe deux méthodes d'intégration temporelle : New mark et la méthode de différences arrière (backwar difference).

La méthode d'intégration temporelle de Newmark, également connue sous le nom de formulation implicite de base nodale, représente l'étape de temps actuelle en fonction des étapes de temps précédentes, en utilisant l'indice n pour la nième étape de temps.

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

Où :

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

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

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

Dans la méthode de différences en arrière, l'étape de temps actuelle est représentée par l'indice n pour la nième étape de temps, et l'expression implique les deux résultats précédents de l'étape de temps.

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

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

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

L'agencement de première ordre de différences temporelles est sélectionné pour s'aligner avec l'algorithme courant d'advection de la méthode VOF. L'étape de temps n produit une contribution à la diagonale de la matrice élémentaire, tandis que les dérivées de l'étape de temps précédente contribuent au terme source.

III.3.3.2. Terme d'advection

Trois approches sont utilisées pour discrétiser le terme d'advection : l'approche de ligne de courant monotone upwind (MSU), l'approche de ligne profilée upwind/Petro-Galerkin (SUPG), et les approches colloquées de Galerkin (COLG).

III.3.3.2.1. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

L'advection est traitée en utilisant une approche de ligne de courant monotone qui se base sur le concept de transport advectionnel le long des lignes caractéristiques. On peut considérer la formulation du transport advectionnel comme le déplacement d'une quantité à travers un domaine à une certaine vitesse. Voir le Schéma III.1 intitulé "Approche des lignes de courant d'Upwind".

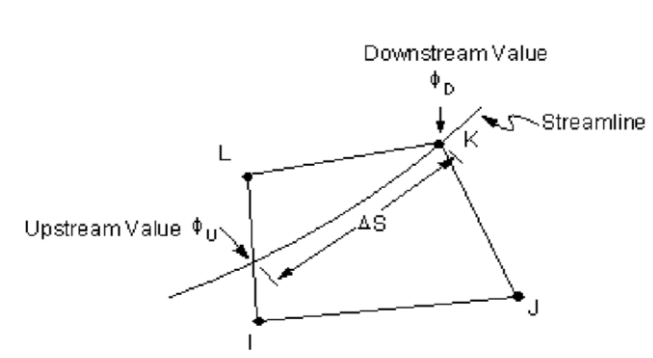


Figure III.1 Approche de ligne de courant d'Upwind [68].

Le champ de vitesse peut être envisagé comme un ensemble de tangentes aux lignes profilées des vecteurs de vitesse. Les conditions limites d'advection peuvent donc être formulées en termes de vitesses aérodynamiques. Dans le transport advectionnel pur, on suppose que le transfert se produit uniquement le long des lignes caractéristiques. Ainsi, le terme d'advection peut être exprimé selon l'équation [68].

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

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

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

La formulation est appliquée à chaque élément, où seul un nœud reçoit des contributions de l'intérieur de l'élément. Le calcul du dérivé est effectué à l'aide d'une différence simple.

$$\frac{\mathbf{d}(\rho \mathbf{C}_{\emptyset} \mathbf{V}_{\mathbf{s}})}{\mathbf{ds}} = \frac{(\rho \mathbf{C}_{\emptyset} \mathbf{V}_{\mathbf{s}} \emptyset)_{\mathbf{U}} - (\rho \mathbf{C}_{\emptyset} \mathbf{V}_{\mathbf{s}} \emptyset)_{\mathbf{D}}}{\Delta \mathbf{s}} \quad \text{(III.24)}$$

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 ascendante est inconnue mais peut être exprimée en fonction des valeurs nodales inconnues entre l'amont et l'aval. Voir le schéma (III.1).

Le processus implique de parcourir tous les éléments et d'identifier les nœuds en amont. Les calculs sont basés sur les vitesses pour déterminer d'où provient la ligne profilée dans le nœud, et des facteurs de pondération sont calculés en fonction de la proximité de l'endroit en amont avec les nœuds voisins.

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

L'approche SUPG consiste à discrétiser le terme d'advection selon une méthode de Galerkin, en ajoutant un terme de diffusion-perturbation qui agit uniquement dans la direction d'advection. Cette formulation est décrite plus en détail dans la référence [68].

$$\left[\mathbf{A}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{advection}}\right] = \int \mathbf{W}^{\mathbf{e}} \left\{\frac{\partial(\rho \mathbf{V}_{\mathbf{x}} \mathbf{C}_{\emptyset} \emptyset)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial(\rho \mathbf{V}_{\mathbf{y}} \mathbf{C}_{\emptyset} \emptyset)}{\partial \mathbf{y}}\right\} \mathbf{d}(\mathbf{vol}) + \mathbf{C}_{2\tau} \int \frac{\mathbf{Zh}}{2\mathbf{U}_{\mathbf{max}}^{\mathbf{e}}} \left\{\frac{\mathbf{V}_{\mathbf{x}}^{\mathbf{e}} \partial \mathbf{W}^{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V}_{\mathbf{y}}^{\mathbf{e}} \partial \mathbf{W}^{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{y}}\right\} \left\{\frac{\mathbf{V}_{\mathbf{x}}^{\mathbf{e}} \partial(\rho \mathbf{c}_{\emptyset} \emptyset)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V}_{\mathbf{y}}^{\mathbf{e}} \partial(\rho \mathbf{c}_{\emptyset} \emptyset)}{\partial \mathbf{y}}\right\} \mathrm{d}(\mathrm{vol}) \quad \text{(III.25)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

Lorsque la maille est raffinée dans l'approche SUPG, les termes de perturbation tendent vers zéro, ce qui permet à la formulation de Galerkin d'atteindre une précision de second ordre. Ainsi, le terme de perturbation assure la stabilité nécessaire qui fait défaut dans la discrétisation pure de Galerkin.

III.3.3.2.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

L'approche COLG utilise la même méthode de discrétisation que l'approche SUPG, mais avec un concept de colocalisation. Dans cette méthode, un deuxième ensemble de vitesses, basées sur les éléments, est utilisé pour satisfaire l'équation de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont utilisées pour satisfaire les équations de quantité de mouvement. Cette approche est décrite plus en détail dans la référence [68].

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

Dans cette approche, l'équation de pression est dérivée à partir des vitesses nodales basées sur les éléments, ce qui peut conduire à une formulation généralement asymétrique. Cela permet de préserver la conservation exacte même sur les mailles grossières.

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].

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

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] :

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

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

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

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

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

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

III.3.3.4 Termes source

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

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

III.4. Interaction entre particule-structure

L'interaction entre le fluide et la structure à l'interface du maillage génère une pression, tandis que le mouvement des structures produit une "charge fluide". Les équations régissant ce phénomène se présentent sous forme matricielle.

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

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

La matrice [R]représente le couplage entre la surface effective de chaque nœud sur l'interface fluide-structure (FSI). Elle tient compte de la direction vectorielle normale définie pour chaque paire de faces fluides et de l'élément structurel coïncident avec la surface d'interface. Les quantités de structure et de charge fluide générées à l'interface sont des fonctions des degrés de liberté nodaux inconnus.

Conclusion

Dans ce chapitre, les méthodes numériques pour résoudre les problèmes thermiques ont été présentées, notamment la discrétisation de l'équation de transport par la méthode des éléments finis afin de l'exprimer sous une forme algébrique.

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET RÉSULTATS

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une étude de simulation numérique sur l'effet de la chute d'aluminium sur un substrat en acier, en comparaison avec l'étude de M. Xue et al. [69]. De plus, nous examinons des simulations numériques de l'effet d'une goutte d'aluminium sur un substrat en acier anodisé, en modifiant l'angle de goutte . Les résultats ont été obtenus à partir d'une simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel « ANSYS ».

IV.1 ANSYS

Le code de calcul ANSYS est un programme Elément Finis permettant des structures tridimensionnelles dans les domaines suivants : thermiques, mécanique, statiques et dynamique
linéaires et nom-linéaires, interaction fluide-structure, analyse à la fatigue…
Le code propose une libraire d'étalement pour modéliser correctement les structures et les différents effets recherchés (poutres, coques, solide, fluide, matrices de raideur, de masse, d'amortissement, etc.).

IV.1. 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

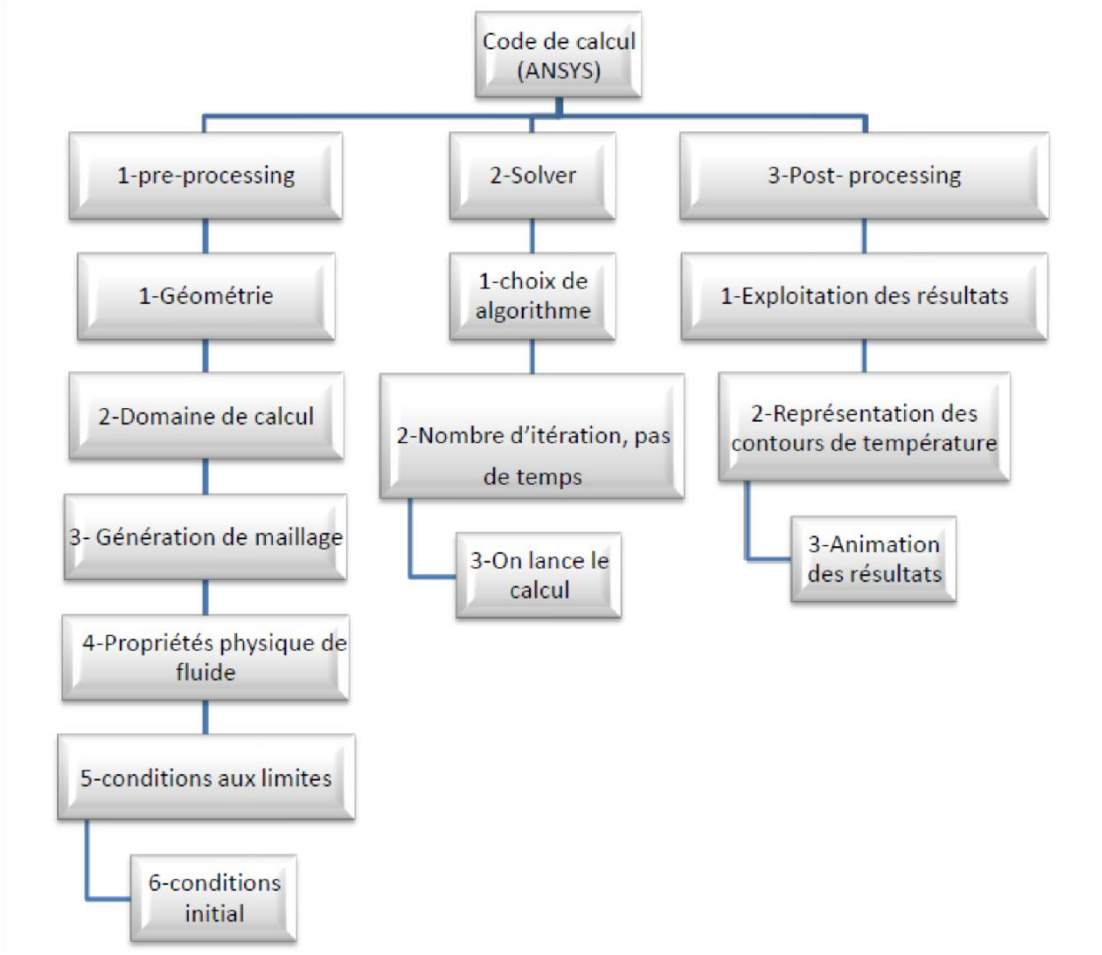
• ANSYS Design Space est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages 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



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 **:**

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

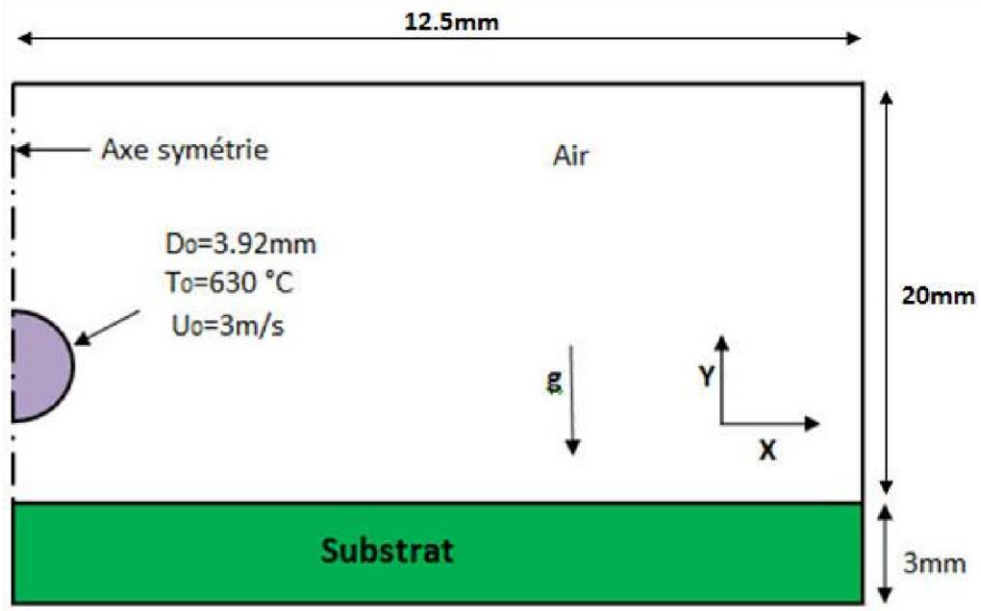
$\mu = 2.87\times10^{-9}\exp(2{,}05.10^{4}/T)$

Pour l'acier **:**

$\rho = 0.9246\times10^{4} - 1.481\times T + 1.425(T/100)^{2}$ (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



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)

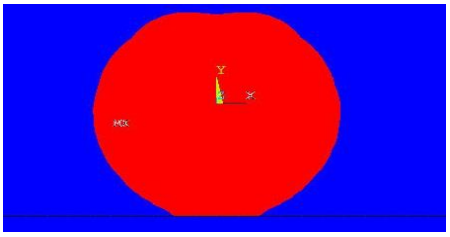
Tableau IV.1 Les prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés

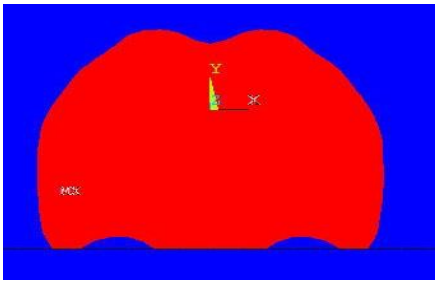
IV.3 Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue

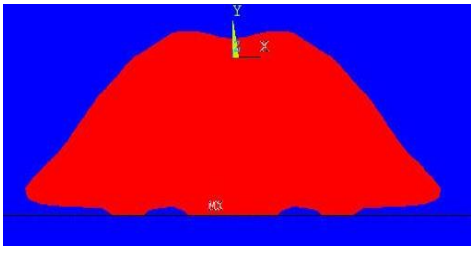
IV.3.1 Identification

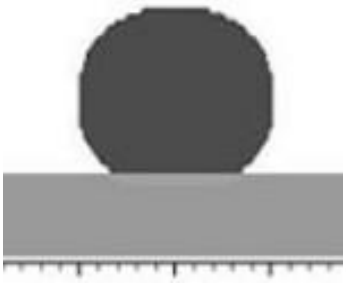
Pour illustrer les résultats de la simulation de contact/impact utilisant la technique FSI décrite ci-dessus, on a examiné l'exemple de validation présenté par M. Xue et al [69]. Cet exemple porte sur l'impact d'une particule d'alliage d'aluminium 380 de diamètre de 3,92 mm et à une température initiale de 630°C à une vitesse de 3 m/s sur un substrat plat en acier à outils H13 mesurant 12,5 mm sur 3 mm, initialement à une température de 200°C.

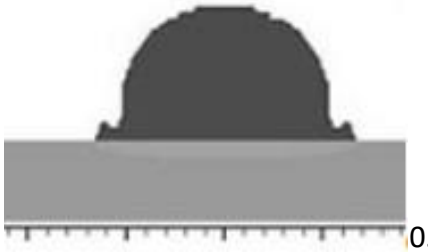
Les résultats de l'analyse montrent que le comportement dynamique de la gouttelette est en bon accord avec les images expérimentales. Après le premier contact de 0,1 ms, la gouttelette se propage de manière symétrique par rapport au point d'impact. Toutefois, en raison de sa forme convexe, la pente de la goutte diminue progressivement au fil du temps, ce qui entraîne un glissement lent sur le substrat jusqu'à l'étalement complet. Il est à noter que le liquide suit la topographie de la surface, ce qui entraîne une projection verticale de l'écoulement de liquide perpendiculaire à la surface, en raison de son inertie.

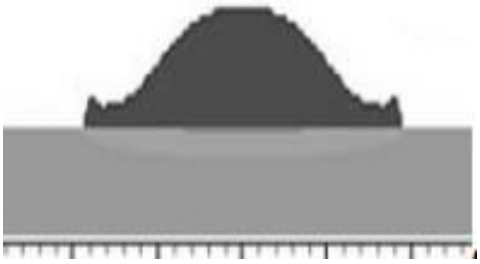

t=0.1ms


t=0.3ms


t=0.7ms


0.1ms


0.3m



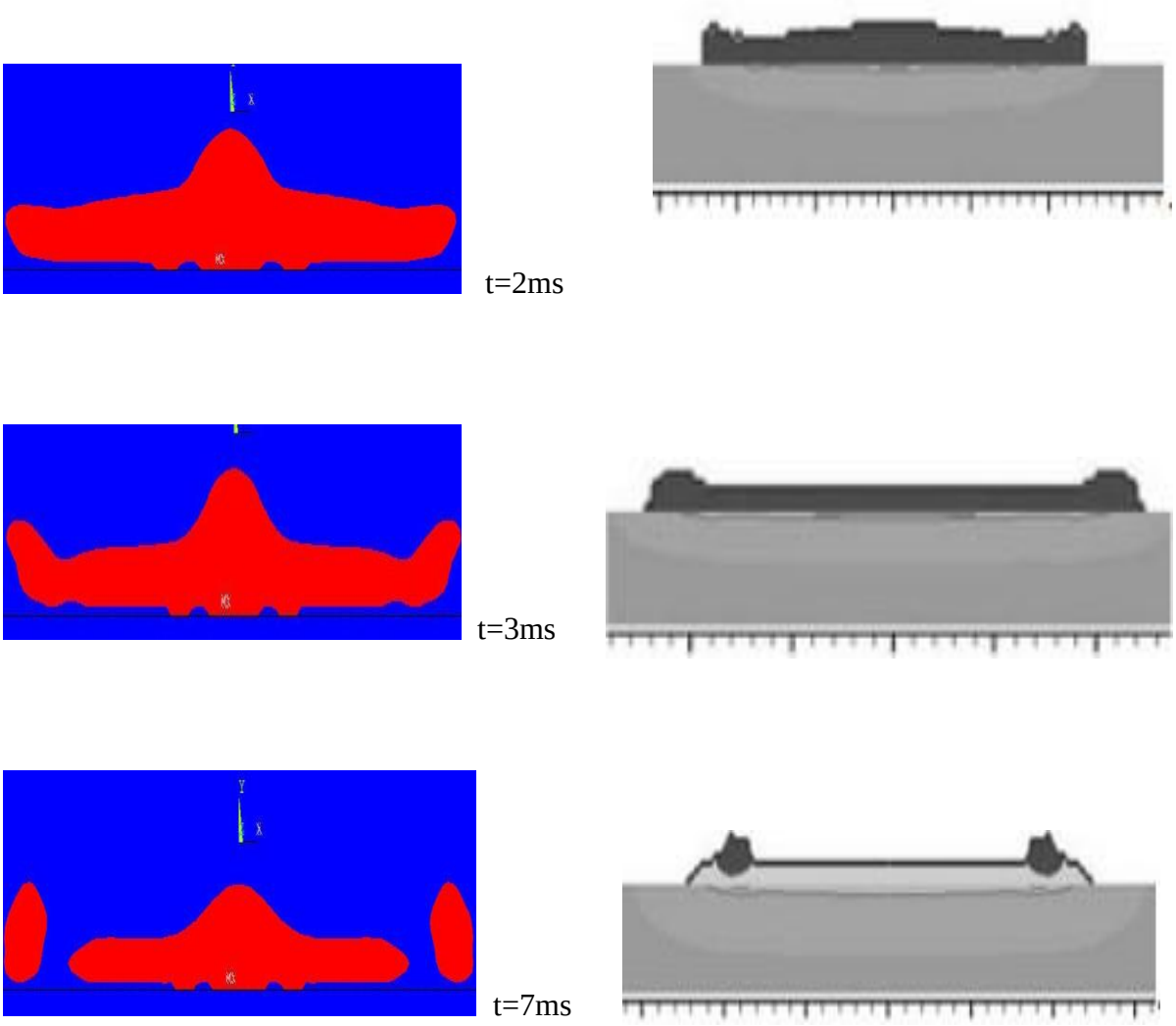


Figure IV.1 :L'impact d'une particule en Aluminium d'un diamètre de 3.92mm Initialement a une Température de 630°C et une vitesse de 3m/s sur Substrat en Acier d'outil initialement a 200°C

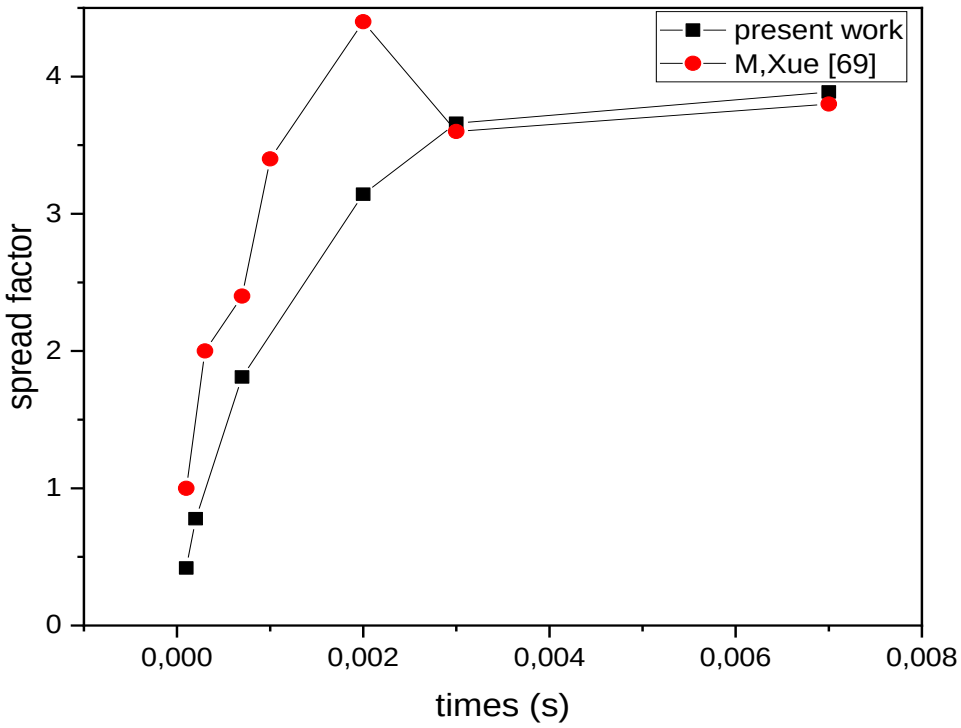


Figure IV.2 Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions.

La figure IV.2, 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 = 3ms, 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 [69].

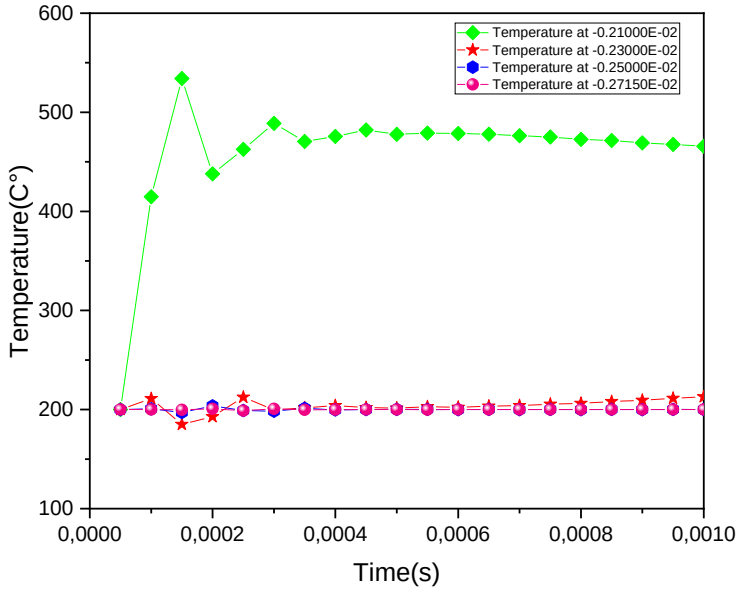


Figure IV 3: Champ de température en fonction de temps pour quatre positions transversale dans le substrat

La figure qui représente la variation de la température en fonction de temps pour quatre position dans le substrat, on remarque que :

Pour Y1 : point situé sous la ligne d'impact, la température augmente rapidement, puis se stabilise en varions autour d'une température de 470°C avec une amplitude importante.

Pour Y2 : La température augmente légèrement, puis se stabilise.

Pour Y3 et Y4 : Sous la ligne du substrat, la température reste quasi-constante et égale à la température initiale du substrat.

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

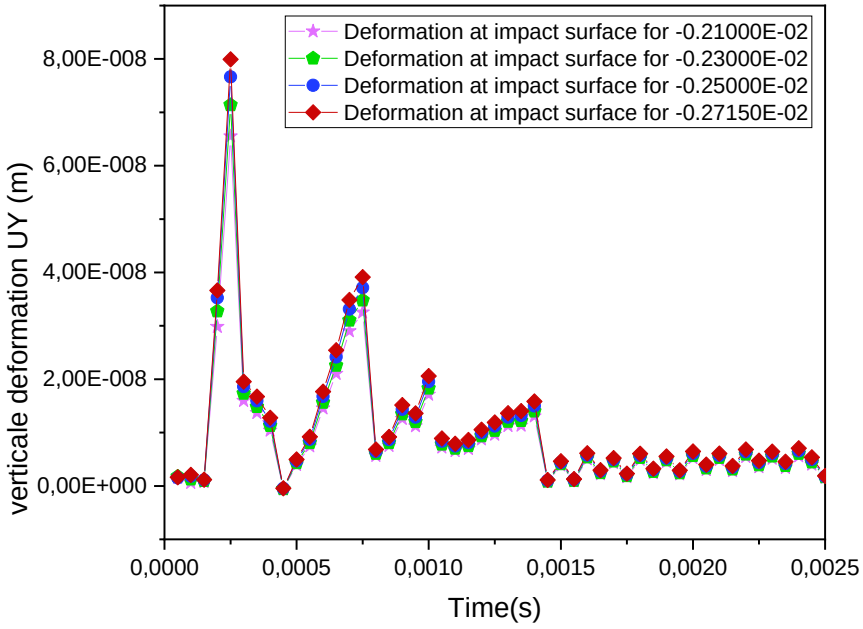


Figure IV 4 :déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=4.5°)

La figure illustre la déformation du substrat en fonction du temps, en utilisant quatre points avec un angle α=00°, nous remarquons une réaction du substrat jusqu'à 80 nm, après cela il se stabilise à partir t= 1.5ms, nous pouvons conclure que le substrat est élastique.

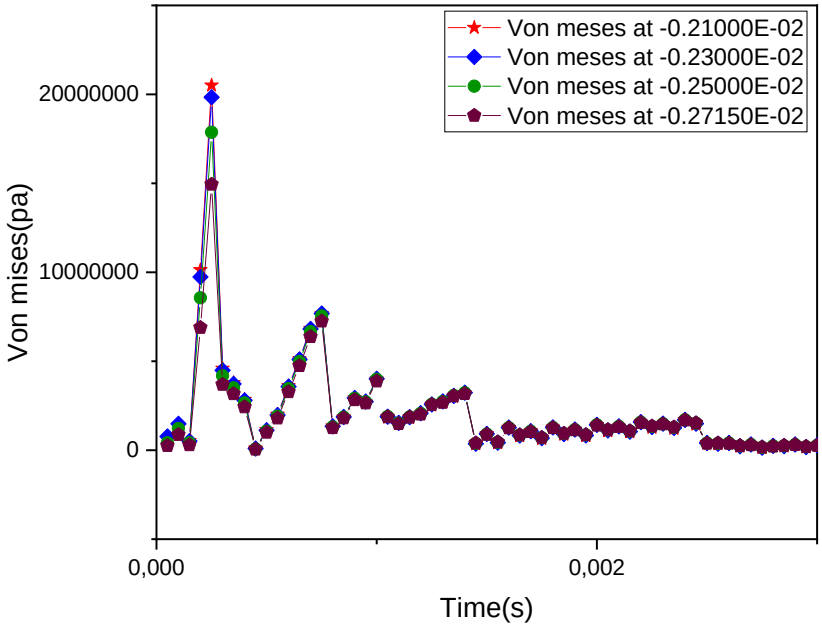


Figure IV 5 Von mises stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps.

Figure 5 : illustre l'évolution des contraintes de traction sur le substrat en fonction du temps, spécifiquement jusqu'a t=1.5ms. On observe que la contrainte de traction augmente et atteint 20 MPa, puis se stabilise. Cette observation explique la dispersion partielle de certaines de ces pressions, qui cherchent ainsi à atteindre de nouveaux états d'équilibre en établissant un équilibre mécanique.

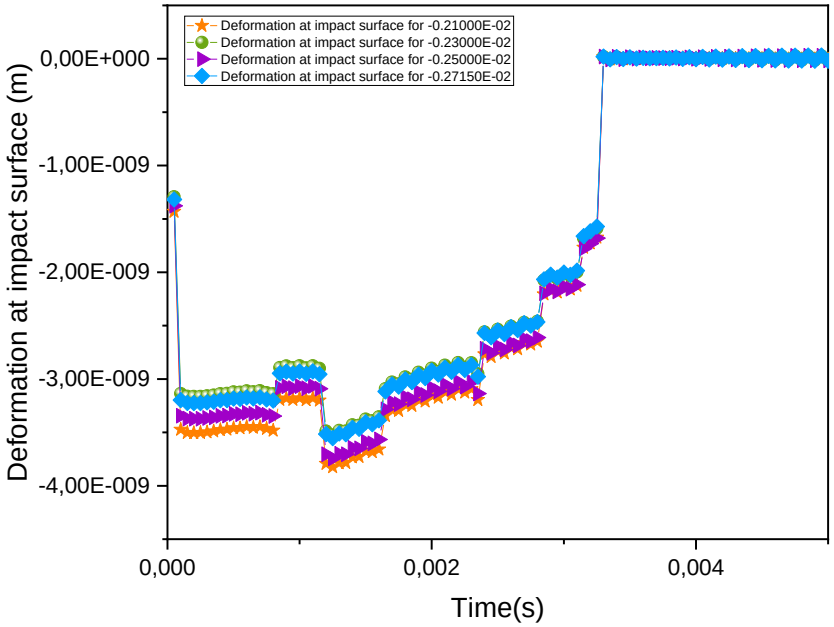


Figure IV.6 déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=4.5°)

La figure illustre la déformation du substrat en fonction du temps, en utilisant quatre points avec un angle α=4.5°. Nous pouvons constater que la déformation atteint un arrêt à une valeur de 4 nm. De plus, nous remarquons que le substrat ne réagit pas, ce qui suggère qu'il n'est pas élastique.

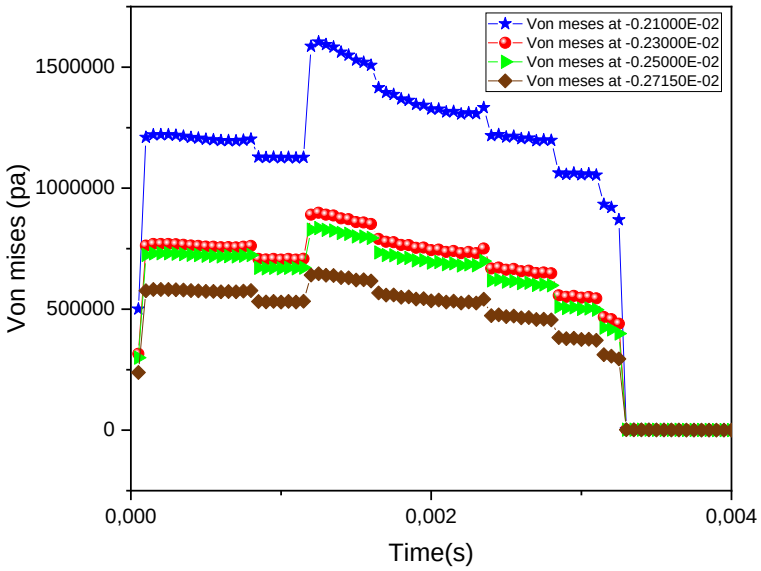


Figure IV.7 : Von messes stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=4.5°)

Figure 2 représenté von mises stress dont substrat en 4 point par l'angle α=4.5 en fonction de temps , en remarque la von mises est augment jusqu'à 1.5Mpa, après cela est stabiliser en t=3.33ms , Cette observation explique la dispersion partielle de certaines de ces pressions, qui cherchent ainsi à atteindre de nouveaux états d'équilibre en établissant un équilibre mécanique.

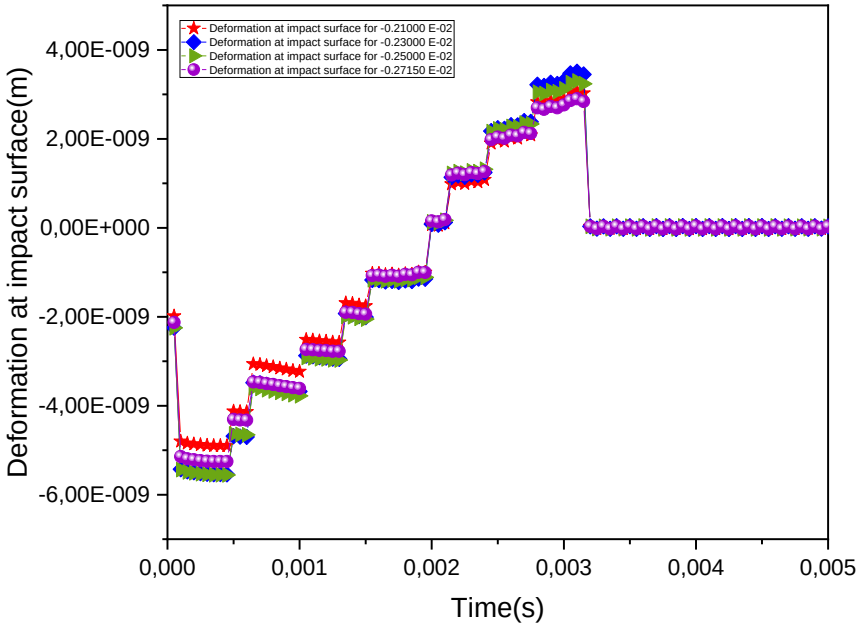


Figure IV.8 :déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=8°)

La figure représente la déformation du substrat en utilisant quatre points avec un angle α=8° en fonction de temps. Nous pouvons observer que la déformation s'arrête à une valeur de 6 nm. Au-delà de ce seuil, nous remarquons une réaction du substrat jusqu'à 4 nm, après quoi il se stabilise en t= 3ms. Par conséquent, nous pouvons conclure que le substrat est élastique.

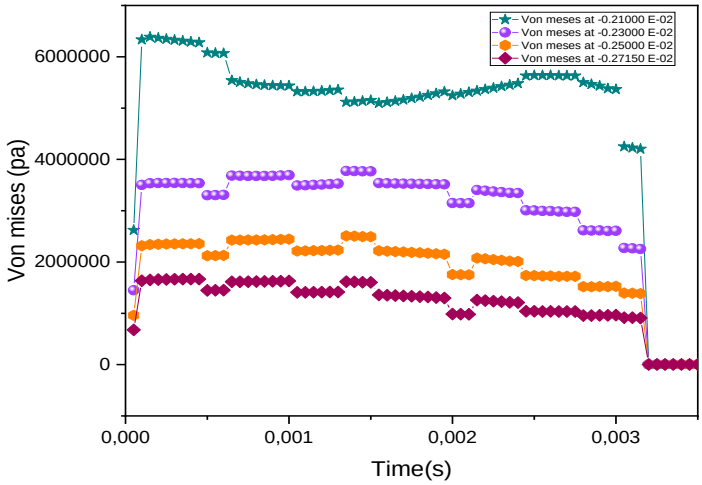


Figure IV.9 : Von messes stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=8°)

Figure 2 représenté von mises stress dont substrat en 4 point par l'angle α=8° en fonction de temps , en remarque la von mises est augment jusqu'à 6Mpa, après cela est stabiliser en t=3ms , Cette observation explique la dispersion partielle de certaines de ces pressions, qui cherchent ainsi à atteindre de nouveaux états d'équilibre en établissant un équilibre mécanique.

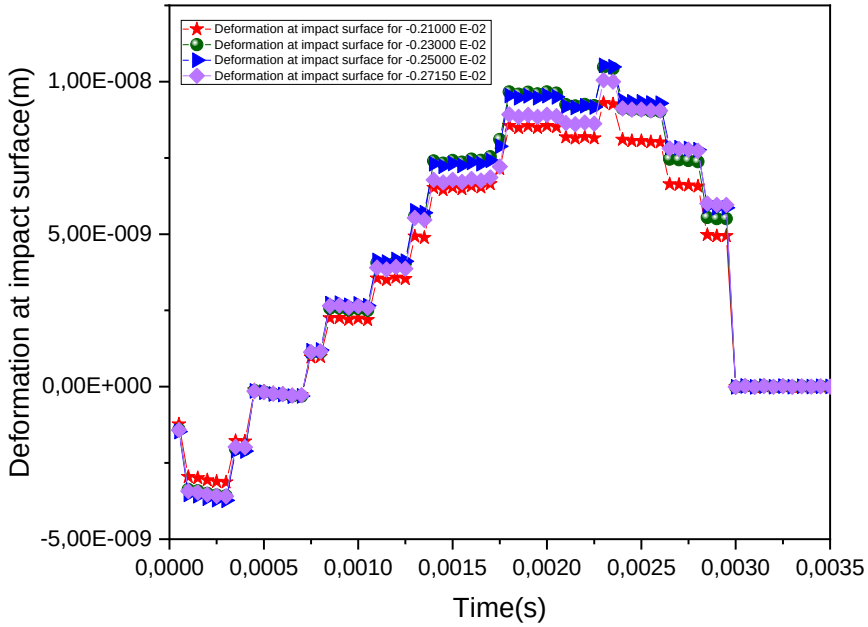


Figure IV.10 :déformation dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=12°)

La figure représente la déformation du substrat en utilisant quatre points avec un angle α=12°. Nous pouvons constater que la déformation s'arrête à une valeur de 5 nm en peu de temps. Au-delà de ce point, nous observons que la réaction du substrat cesse à 10 nm. En conclusion, nous pouvons affirmer que le substrat est élastique.

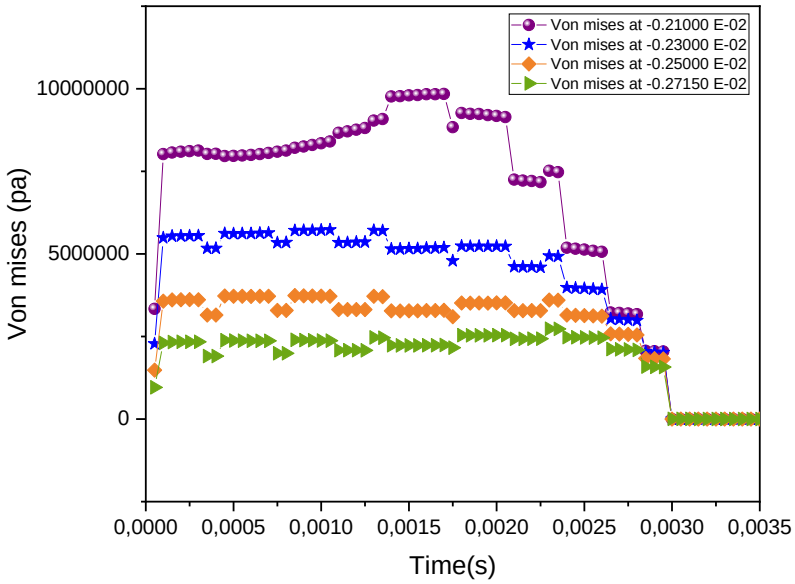


Figure IV.11 : Von messes stress dans quatre positions dans le substrat dans le temps pour (α=12°)

Figure 2 représenté von mises stress dont substrat en 4 point par l'angle α=12 en fonction de temps , en remarque la von mises est augment jusqu'à 10Mpa, après cela est stabiliser en t=3ms , Cette observation explique la dispersion partielle de certaines de ces pressions, qui cherchent ainsi à atteindre de nouveaux états d'équilibre en établissant un équilibre mécanique.

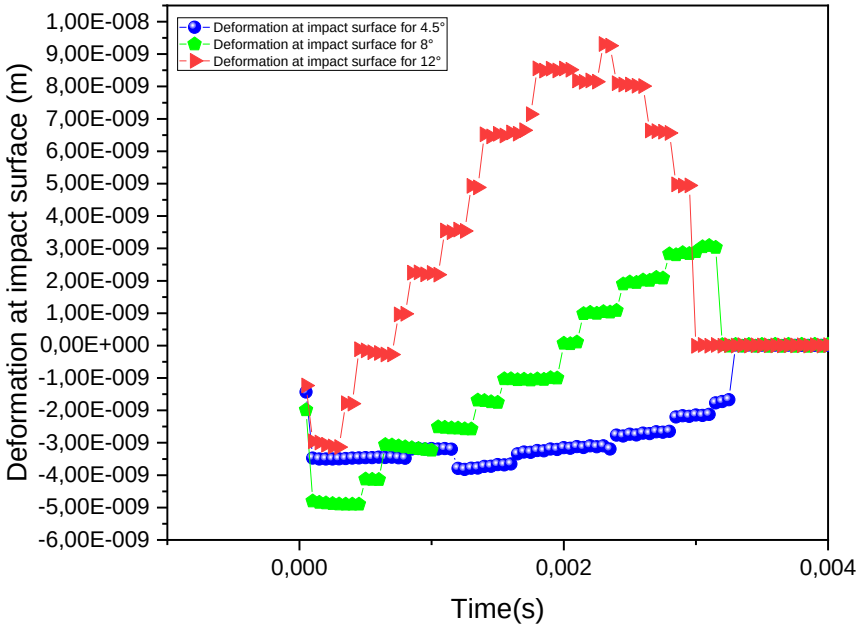


Figure IV.12 Déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas

La Figure IV.12 qui représenté la déformation au point d'impact dans le temps pour les trois cas, on remarque que la déformation pour (α=12) est le moins déformé et le plus reactif , nous pouvons conclure que plus l'angle est grande moins il y a de distorsion

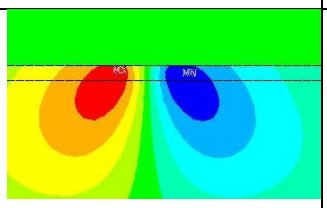
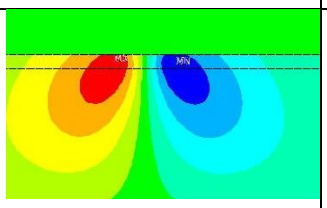
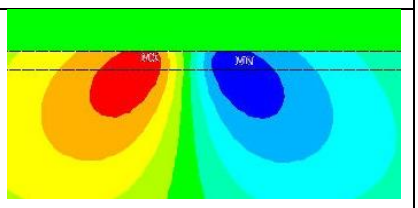
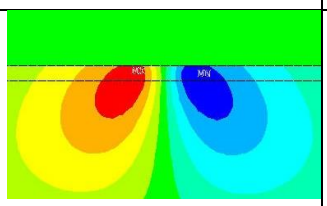
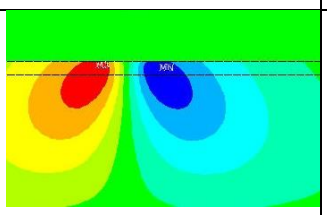
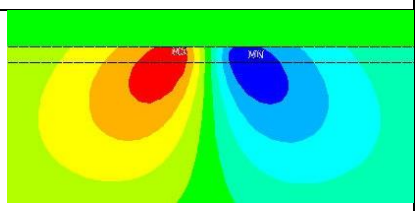
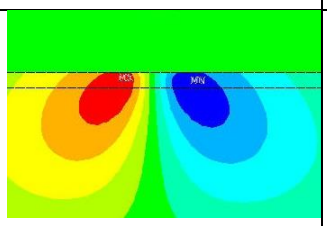
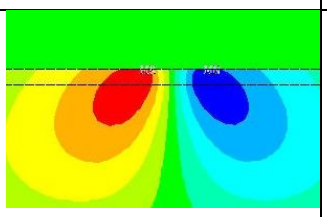
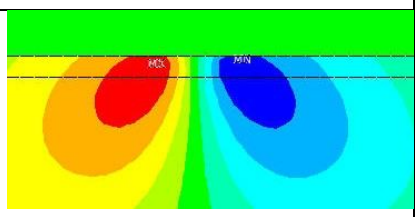
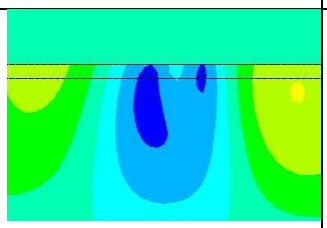
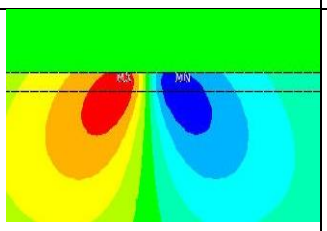
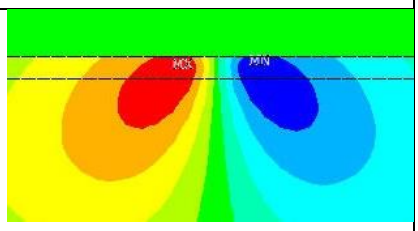
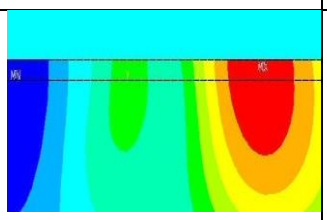
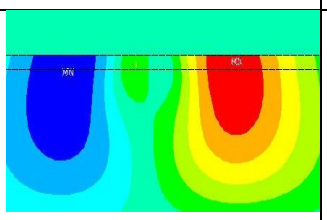
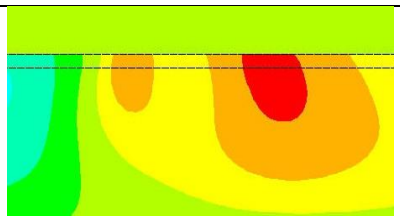
	4.5°	8°	12°
0.015(ms)			
0.3(ms)			
0.8(ms)			
3 (ms)			
7 (ms)			

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

La concentration de contraintes sur le substrat et les déformations sont inspectées ici pour donner un aspect mécanique explication de l'interaction particule/substrat La plaque commence à se déformer à partir du moment (t=3ms)

Conclusion :

Les résultats obtenus à partir du modèle numérique exposés dans ce chapitre mettent en évidence l'impact des différents paramètres impliqués dans le processus d'étalement et de solidification des lamelles d'aluminium déposées sur des substrats métalliques (en particulier l'acier à outil H13). L'ensemble de ces résultats démontre que :

- L'angle d'impact est d'une importance cruciale dans la formation des lamelles.
- Pour l'angle d'impact 00° on peut voir qu'il y un mauvaise d'étalement
- Pour des angles d'impact variant entre 4.5°et 12° lamelle est rebondit.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

La pulvérisation de gouttelettes métalliques ou céramiques sur un substrat pour la fabrication de revêtements fins est un procédé industriel couramment utilisé. Cependant, les phénomènes qui se produisent à l'échelle des gouttes ne sont pas encore complètement maîtrisés en raison des difficultés expérimentales liées à l'analyse des interactions entre ces particules fluides, la solidification et la refusion éventuelle des gouttes précédentes. Ces difficultés sont principalement dues aux échelles de temps et d'espace impliquées, qui sont de l'ordre de la milliseconde et du millimètre respectivement. Par conséquent, il est nécessaire de recourir à des outils numériques complexes pour prendre en compte les différents aspects physiques de la pulvérisation.

Ce travail de recherche est principalement axé sur la simulation numérique des phénomènes de projection par plasma de dépôts d'aluminium en utilisant la méthode EF/VOF et la méthode d'interaction fluide-structure (FSI). L'objectif est d'étudier les propriétés morphologiques et thermiques liées à l'impact et à la solidification rapide d'une lamelle sur un substrat pré-oxydé.

Dans le premier chapitre, nous avons examiné la projection thermique, ses paramètres et ses caractéristiques, ainsi que le traitement thermique des particules dans le jet et les interactions plasma-particules. Nous avons également abordé la théorie de l'adhésion, qui continue de susciter des interrogations, ainsi que la préparation de surface, la rugosité, l'adhésion et la quantification de l'adhérence des revêtements. Nous avons également exploré les domaines d'utilisation de ces revêtements dans les secteurs industriels.

Les deuxième et troisième chapitres décrivent les équations et les méthodes numériques qui expliquent le phénomène physique de l'étalement des particules avec solidification sur un substrat.

Dans le dernier chapitre, nous avons effectué des simulations en 2D cartésien. Tout d'abord, nous avons validé nos simulations en nous assurant de leur bon fonctionnement. Ensuite, nous avons étudié l'impact de particules d'aluminium sur un substrat en acier en modifiant l'angle d'impact, en utilisant la méthode FSI. Les résultats obtenus montrent que le paramètre étudié joue un rôle important dans la

morphologie finale de la lamelle. La projection de particules (gouttes) 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.
- L'angle d'impact altère le transfert thermique lamelle-substrat et entraîne une solidification plus lente des lamelles.
- Pour des angles d'impact variant, lamelle est rebondit.

LES RÉFÉRENCES

Les référances:

[1]. C.L. Bot, S. Vincent, E. Meillot, F. Sarret, J. Caltagirone, L. Bianchi, Numerical simulation of several impacting ceramic droplets with liquid/solid phase change, Surf. Coat. Technol. 268 (2015) 272–277

[2]. D. Zhang, L. Qi, J. Luo, H. Yi, X. Hou, Direct fabrication of unsupported inclined aluminum pillars based on uniform micro droplets deposition, Int. J. Mach. Tools Manuf. 116 (2017) 18–24.

[3]. M.G. Shen, B.Q. Li, Y. Bai, Numerical modeling of YSZ droplet impact/spreading with solidification microstructure formation in plasma spraying, Int. J. Heat Mass Transf. 150 (2020) 119267

[4]. P.K. Galenko, D. Jou, Rapid solidification as non-ergodic phenomenon, Phys. Rep. 818 (2019) 1–70.

[5]. S.L. Li, Z.Y. Wei, J. Du, P. Wei, Z.X. Hou, B.H. Lu, The fusion process of successive droplets impinging onto a substrate surface, Appl. Phys. A 120 (1) (2015) 35–42.

[6]. Y. Bai, L. Zhao, Y. Wang, D. Chen, B. Li, Z. Han, Fragmentation of in-flight particles and its influence on the microstructure and mechanical property of YSZ coating deposited by supersonic atmospheric plasma spraying, J. Alloys Compd. 632 (2015) 794–799.

[7]. S. Chandra, J. Mostaghimi, Spray impingement fundamentals, Metal Sprays and Spray Deposition, Springer, 2017, pp. 177–220.

[8]. X. Ma, P. Cheng, X. Quan, Simulations of saturated boiling heat transfer on bioinspired two-phase heat sinks by a phase-change lattice Boltzmann method, Int. J. Heat Mass Transf. 127 (2018) 1013–1024.

[9]. C. Zhang, P. Cheng, W.J. Minkowycz, Lattice Boltzmann simulation of forced condensation flow on a horizontal cold surface in the presence of a non-condensable gas, Int. J. Heat Mass Transf. 115 (2017) 500–512.

[10]. H. Zuo, H. Li, L. Qi, J. Luo, S. Zhong, Y. Wu, Effect of non-isothermal deposition on surface morphology and microstructure of uniform molten aluminum alloy droplets applied to three-dimensional printing, Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 118 (2015) 327–335.

[11]. S. Gong, P. Cheng, X. Quan, Two-dimensional mesoscale simulations of saturated pool boiling from rough surfaces. Part I: Bubble nucleation in a single cavity at low superheats, Int. J. Heat Mass Transf. 100 (2016) 927–937.

[12]. C.MOREAU,J.FBISSON,R.S.LIMA,B.RMARPLE,Diagnosticforadvancedmaterial

sprocessingbyplasmaspraying,PureAppl.Chem., 77(2), p 443-462(2005).

[13]. A.A.SYED,A.DENOIRJEAN,P.DENOIRJEAN,J.CLABBE,P.FAUCHAIS,Investigationofphenomenainfluencingpropertiesofplasmasprayedceramic-metalcompositedeposits,High TemperatureMaterial Processes,8 (2),p253-272 (2004).

[14]. ASIFANSARSYED,Coprojectiond‟alumineetd‟acierinoxydableparplasmad‟arc.Thesesdel‟universitédeLimogesN°d‟ordre3-2004(200.

[15]. H.SINGH,B.S.SIDHU,D.PURI,S.PRAKASH,Useofplasmaspray technology fordepositionofhightemperatureoxidation/corrosionresistantcoatings–areview,MaterialsandCorrosion, 58, (2), p 92-102(2007).

[16]. M.RAHMANE,G.SOUCY,M.I.BOULOS,Enthalpyprobecalibrationandmeasurements under plasma conditions, Plasma Chem. & Plasma Process., 16 (1), pp169S-190S(1996).

[17]. P.FAUCHAIS,J.COUDERT,M.VARDELLE,A.VARDELLE,A.DENOIRJEAN,Diagnosticsofthermalsprayingplasmajets,inPlasmaSpraying-TheoryandApplications, (ed.) R. Suryanarayanan, (pub.) World Scientific Pub. Co., Singapore, pp61-94(1993).

[18]. B.PATEYRON,M.F.ELCHINGER, G.DELLUC,P.FAUCHAIS,ThermodynamicandtransportpropertiesofAr-H2andAr-Heplasmagasesusedforsprayingatatmosphericpressure:Propertiesofmixtures,PlasmaChem.AndPlasmaProc.,12(4),pp 421 (1992).

[19]. P.FAUCHAIS,J.F.COUDERT,M.VARDELLE,A.VARDELLE,A.DENOIRJEAN,Diagnosticsofthermalsprayingplasmajets,J.ThermalSprayTechnology,1(2),pp117-128(1992).

[20]. M.I.BOULOS,P.FAUCHAIS,E.PFENDER,Thermalplasmas:Fundamentalsandapplications- Vol.1,(pub.)PlenumPublishingCorporation, NewYork,USA, (1994).

[21].]P.FAUCHAIS,J.F.COUDERT,M.VARDELLE,Diagnosticsofplasmaprocessing,inPlasmaDiagnostics, (pub.) AcademicPress, Boston, USA, pp349 (1989).

[22]. C.BONET,Thermalplasmaprocessing,ChemicalEngineeringProgress,pp63-69.(1976).

[23]. J.MOSTAGHIMI,P.PROULX,M.I.BOULOS,Modelingofthethermaltreatmentofpowdersinaplasmajetunderdenseloadingconditions,inProc.InternationalSymposiumonPlasmaChemistry8,(ed.)K.Akaski,A.Kinburn,(pub.)UniversityofTokyo,1,pp13-19.(1987).

[24]. P.FAUCHAIS,A.VARDELLE,Heat,massandmomentumtransferincoatingformationby plasma spraying,Int.J. Therm.Sci., 39, pp 852-870 (2000).

[25]. J.L.ENGELKE,Heattransfertoparticlesinplasma,inA.I.Ch.E.meeting,LosAngeles,USA, (1962).

[26]. B.PATEYRON,M.F.ELCHINGER,G.DELLUC,P.FAUCHAIS,Thermodynamicand trnsportpropertiesofAr-H2andAr Heplasmagasesusedforsprayingatatmosphericpressure:Propertiesofmixtures,PlasmaChem.An dPlasmaProc.,12(4),pp 421(1992).

[27]. S.JANISSON,A.VARDELLE,J.F.COUDERT,E.MEILLOT,B.PATEYRON,P.FAUC HAIS,PlasmasprayingusingAr-He-H2gasmixtures,J.ThermalSprayTechnology,8 (4), pp 545-552 (1999).

[28]. WUS.,Polymer Interface andAdhesion,1sted.,MarcelDekker,1982.

[29]. EBNESAJJADS.,Handbookofadhesivesandsurfacepreparation,technology,application sand manufacturing, Elsevier, 2011.

[30]. JEANDINM.,KOIVULUOTOH.,VEZZUS.,CoatingProperties,in:ModernColdSpray,e d. J.Villafuerte, Springer, 2015, p. 107-224

[31]. HU H.X., JIANG S.L., TAO Y.S., XIONG T.Y., ZHENG Y.G., Cavitation erosionand jetimpingement erosion mechanism of cold sprayed Ni–Al2O3 coating, Nuclear EngineeringDesign,241, 2011, p. 4929-4937.

[32]. GUETTAS.,Influencedesconditionsd'impactsurl'adhérencedecuivreprojetédynamique mentsurdel'aluminium,Thèsededoctorat,MINES ParisTech,Février2010.

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

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

[35]. LI W.Y., ZHANG C., GUO X.P., DEMBINSKI L., LIAO H., CODDET C., Impact Fusion ofParticle Interfaces in Cold Spraying and Its Effects on Coating Microstructure, in: ThermalSpray 2007: Global Coating Solutions, ed.B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C.Lau, C.J.

Lietal.,ASM, 2007, p. 60-65

[36]. BERNDT C.C., LIN C.K., Measurement of adhesion for thermally sprayed materials, JournalofAdhesion ScienceandTechnology, 1993, 7, p.1235-1264

[37]. SILVER E., CHASSAING E., GORYACHEV S.B., Problèmes de mesure d‟adhérence derevêtementmétalliquesursubstratmétallique,JournaldePhysique IV, 2003,106,p.131-140

[38]. SEXSMITH M., TROCZYNSKI T., Peel adhesion test for thermal spray coatings, Journal ofThermalSprayTechnology, 1994, 3, p. 404-411

[39].]HANG Y., LIU G., HUANG K., JIN W., Mechanical properties ad interfacial adhesionofcompositemembranesprobedbyin -situnano indentation/scratchtechnique,JournalofMembraneScience, 494,2015, p.205-215

[40]. JOHNSTON R.E., EVANS W.J., Freestanding abradable coating manufacture and tensile testdevelopment,Surface& CoatingsTechnology, 202(4-7), 2007, p.725-729

[41]. AMADA S., YAMADA H., YEMATSU S. et al., Modelling and measurements ofadhesivestrengthofthermalsprayedcoatings,in:InternationalThermalSprayConference,Orlando,28May-5 June1992, p. 915-920

[42]. RICKERBYD.S.,Areviewofthemethodsforthemeasurementofcoating-substrateadhesion,Surfaceand Coatings Technology, 1988,36, p. 541-557

[43]. 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, MINESParisTech, Décembre2010

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

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

[46]. C.RICHARD,Étudedescaractéristiquesmécaniquesderevêtementsprojetésparprocédé

sthermiques, Thèsedel'UTC, Compiègne, Déc. 1992

[47]. //www.sulzermetco.com/tech/tip13.html

[48]. C. Ding, J. Li, L. Zhang, X. Yu, Wear Evaluation of Plasma Sprayed Oxide and CarbideCoatings:MeetingtheChallengesofthe21stCentury,(Ed.) C.Coddet,(Pub.) ASMInternational,
MaterialsPark,Ohio,USA,(1998),pp275-278

[49]. TOUMI Aboubaker, BOUDERRADJI Mohamed « L'effet de la surfaceintermétalliquen de SnAgCu sur la fiabilité d'un ensemble de relie semi-conducteur dePuissance»diplômend'ingénieure; Universitéde YahiaFers deMédéa; 2009.

[50]. ZirariMounir «Modélisationdelaconstructiond'undépôtpar projectionthermique: delaformationd'unelamelleàl'empilementdescouchesthèsededoctorat,universitéSaaddahlab,Blida Algérie.Park,Ohio,USA,(2003),pp323-327

[51]. R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S. Chandra, M. Charmchi (2003) J Therm SprayTechnol.

[52]. F. Ben ettouil(2008)" Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasmad'arc"thèse de doctoratà UniversitédeLimoges

[53]. H.Makhlouf(2008)"Modélisationnumériquedusoudageàl'arcdesaciers"thèsededoctoratàl'EcoleNationale Supérieure desMines de Paris.

[54]. **F**. Ben Ettouil, B. Pateyron, H. Ageorges, M. El Ganaoui, P. Fauchais, O. MazhorovaFastModelling of phase change in a particle injected within a d.c. plasma jet J. Thermal Spray Technology,16, 2007,744-750.

[55]. V.R.Voller,C.R.Swaminathan,andB.G.Thomas.(1990)Fixedgridtechniquesforphasechangeproblems:Areview.NumericalHeattransfer PartB,17:155-169.

[56]. V.R.Voller. (1990)Fast implicit finite difference method for the analysis ofphasechangeproblems.IMA Journalof NumericalAnalysis,30:875-898.

[53] :M.Rappaz,M.Bellet,andM.Deville.(2003)NumericalModelinginMaterialsscienceandEngineering.Springerseriesin Coputational Mathematics,Springer-verlagedition.

[54] B. Ramaswamy &M. Kawahara. Lagrangian finite element analysis applied to viscous freesurfacefluidflow. Int. J. Numer.Methods fluids, vol.7, p. 953-984,1987.

[55] Ghafouri-AzarR.,ShakeriS.,ChandraS.,andMostaghimiJ.,(2002)"NumericalSimulationof Offset Deposition for Sequential Tin Droplets", Proc. of Int. Thermal Spray Conference Essen, E.Lugscheider (ed.), DVSDüsseldorf,Germany, pp. 972-978.

[56] YKRELEF Hichem « Étude de la distribution des défauts du remplissage des moulespar simulation numérique ». Diplôme de magister ; Université de Yahia Fers de Médéa ;2011.

[57] S. Vincent. Modélisation d'écoulements incompressibles de fluides non-miscibles. Thèse dedoctorat,Université Bordeaux I, 1999.

[58] F.H.HarlowandJ.E.Welsh.«Numericalcalculationoftime-dependentviscousincompressibleflowwithfree surface ». Phys. Fluids,8:2182-2189, 1995

[59] F.H.Harlowand J.P. Shannon.« Thesplashofaliquiddrop».J.Appl.Phys,38(10):38553866,1967.

[60] http://thetis.enscbp.fr/sites/default/files/theses/these_j_breil.pdf.;2012

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

[62] AitmoudidL.(2007)"CouplageFluide-Structurepourlasimulationnumériquedesécoulements fluides dans une conduite `a parois rigides ou élastiques, en présence d‟obstaclesounon". Thèsededoctorat,Universitéd‟Artois.

[63] Patru J. (2005) "Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein deDépôtsPlasmade Zirconeetd‟Acier".Thèsededoctorat,Universitéde Limoges.

[64] Vincent D. (2007)"Contribution à l‟Etude des Propriétés Optiques de Dépôts Plasma deZircone Yttriée: Influences de leurs Caractéristiques Microstructurales et Physico-chimiques".Thèsededoctorat, Université de Limoges.

[65] PironneauO.(1988)"Méthodesdesélémentsfinispourlesfluides",Thèsededoctorat, Masson,Paris ManualofAnsys.2011

[57]. MinxiaXue.YoavHeichal.SanjeevChandra.JavadMostaghimi″Modelingtheimpactofamoltenmetaldropletonasolidsurfaceusingvariableinterfacialthermalcontactresistance″.JMater Sci (2007)

[58]. H.SCARSLAW,J.C.JAEGER,Conductionofheatinsolids,2nded.ClarendonPressOxford. (1959).