REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

Université *Dr. YAHIA FARES* de Médéa

Mémoire de projet de fin d'étude pour

L'obtention du diplôme de master

En génie mécanique

Option : Énergétique et thermique des systèmes

Thème

Etude numérique de la présence des creux surfacique sur l'interaction thermique et dynamique

Proposé et dirigé par :

Dr.ZIRARI Mounir

Co-promotrice : Tahar Souad

présenté par :

M ELLE : ALLOUANE Fatiha

M ELLE : BELLATRACHE Fatima Zahra

Promotion 2014/2015

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui m'ont aidé et en courage durant toutes mes études.

A toute la famille BALLATRECHE surtout ma chère mère et mon cher père , a mes chers frères, Sidali, Saddik, Abderzak, mes belles sœurs Amina, Loubna, Hadjer, ainsi que toutes mes proches la famille BELLATRECHE et RAHMANI.

Ainsi mon neveu Yassine et ma petite nièce Malak .

Et toutes mes amis les quel j'ai partagé mes meilleur moment surtout mon Binôme Fatiha, et mes amies proches Maria Sarah, Soumia, Amina, Faiza, Fatima zahra et FZ, Farah, Ryadh, Ayoub, ……

Et toutes mes Amis de génie mécanique surtout mon promo énergétique et tous les étudient merci.

M^elle : Fatima Zahra



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui m'ont aidé et en courage durant toutes mes études.

A toute la famille ALLOUANE surtout ma chère mère et mon cher père, a mes chers frères, Khaled, Yasmina, Maria, Fatima Zahra et son mari Morad ainsi que toutes mes proches la famille ALLOUANE.

Ainsi monsieur KHALADI Madjid.

Et toutes mes amis les quel j'ai partagé mes meilleur moment surtout mon Binôme Fatima Zahra, et mes amies proches Maria Sarah, Fairouze, Amina, Faiza, Somia,Farah , Yassine , Amine, Ayoub, ……

Et toutes mes Amis de génie mécanique surtout mon promo énergétique et tous les étudient merci.

M^{elle} : Fatiha

Remerciement

Avant tout nous remercions ***ALLAH*** *de nous avoir accordé des connaissances de la science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.*

Nous tenons à remercier chaleureusement et respectivement tons Ceux Qui contribué prés ou loin à la réalisation de ce modeste Projet de fin D'étude en particulièrement notre promoteur ***Mr ZIRARI Mounir et Madame Tahar Souad ainsi Rabhi Ridha.***

Nos vifs remerciement aux membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail, qu'ils trouvent ici notre gratitude à nos enseignants Faculté des sciences de technologie en particulier qui ont contribués A notre formation.

ملخص

هناك العديد من الدراسات النظرية والتجريبية على التفاعل بين القطرات / الركيزة ثم التأثير عليها والنشر خلال عملية الطلاء بواسطة الرش الحراري. في هذا العمل نحن نقترح دراسة تأثير ديناميكي من قطرات الألمنيوم على المعلمات الركيزة للسيطرة على تشكيل الصفيحة وتأثير أقطار البذر والقمم على الصخور القائمة على سطح صلب. ويقدر نموذج تأثير ديناميت التدفق والمرور على اثر (نشر و ترسيخ للانخفاض) باستخدام طريقة عددية بالإضافة الى نموذج التصلب.
نحصل على نتائج جيدة في حالة قطرها 0.6 مم حتى قمم وقيعان تلعب دورا هاما في نشر وترسيخ للشبكة.

الكلمات الرئيسية: البلازما الفائقة, قولم ,قمم , جوف , المحاكاة , تفاعل , اضطراب , العناصر المنتهية , المحاكاة العددية , ANSYS

Résumé

Il y a plusieurs études théoriques et expérimental sur l'interaction des gouttelettes / substrat lors de l'impact et étalement pendant le processus de revêtement par projection thermique. Dans ce travail on propose d'étudier l'impact dynamique des gouttelettes d'aluminium sur substrat aux paramètres contrôlant la formation d'une lamelle. Ainsi que l'influence des diamètres des creux et des pics surfacique sur substrat en acier. Le modèle d'impact estime la dynamique d'écoulement et le passage lors de l'impact (d'étalement et de la solidification de la goutte).a l'aide du la méthode numérique (VOF) couplé à un modèle de solidification.

On a obtenu bon résultat dans le cas de diamètre (0.6mm) donc le diamètre des creux et pics joue un rôle important sur l'étalement et solidification de la melle.

Mots-clés: jet plasma, substrat, pics, creux, simulation, interaction, turbulence, élément finis, simulation numérique, ANSYS.

Abstract

There are several theoretical and experimental studies on the interaction of droplets / substrate upon impact and spreading during the coating process by thermal spraying. In this work we propose to study the dynamic impact of aluminum droplets on substrate parameters controlling the formation of a lamella. And the influence of the diameters of pits and peaks on steel surface substrate. The impact model estimates the flow dynamics and the passage on impact (spreading and solidification of the drop) .a using the numerical method (VOF) coupled to a solidification model

We get good results in the case of diameter (d = 0.6mm) diameter so the peaks and troughs plays an important role in spreading and solidification of the mesh.

Key-words: plasma jet, substratum, pics, hollow, simulation, interaction, turbulence, finite element, numerical simulation, ANSYS.

Sommaire

Dédicace page

Remerciements

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale…….....1

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction…….3

I.1. La projection thermique……3

I.1.1. La projection à la flamme……..3

- Flamme simple……..4
- HVOF ou Flamme supersonique……..4
  - Projection hvof……4
  - Projection hphvof……5
- Projection flamme poudre…….5
- Projection flamme fil…….....5
- Projection flamme baguettes céramiques……..6
- Canon à détonation…….7

I.1.2. Projection par arc…….7

- Projection arc électrique entre deux fils…….7
- Projection arc fil……..8
- Plasma d'arc soufflé……...9

I.1.3.Matériaux d'apport……..10

I.1.4.Projection plasma……....10

I.1.4.1.Définition……..10

Sommaire

I.1.4.2. Ecoulement du jet plasma……....11

- Modélisation De l'écoulement……11
  - Température de l'écoulement……..12
  - Pression et debit de gaz…….....12
  - Vitesse de l'écoulement……13

I.1.4.3.La torche à plasma……..13

I.1.4.3.1. Description du fonctionnement du plasma…….....13

I.1.4.3.2 Amorçage de l'arc……14

I.1.4.3.3.La nature des gaz plasmagènes……...14

I.1.4.3.4.Injection des gaz…….14

I.1.4.3.5.Formation du jet plasma…….15

I.2.Traitement des particules dans le jet plasma……15

I.2.1. Injection de la poudre……..16

I.3.Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement……16

- Transfert de quantité de mouvement……..17

I.4.Substrats……...17

I.4.1.Préparation de substrat…….17

I.4.2.Ecrasement des particules sur le substrat……..18

I.4.3.Construction du dépôt……...18

- Modélisation numérique de l'impact d'une particule
  Fondue sur une surface solide avec transfert thermique…….18

I.4.4.Etalement de la particule……19

I.5.La solidification des lamelles……20

I.6.Formation du dépôt……...20

I.7.À Oxydation des substrats…….21

I.8.Défauts des revêtements et mesure de porosité…….21

I.9.L'état de l'art……21

Conclusion……22

Chapitre II : Modélisation mathématique

Introduction…….24

II.1.Modèle dynamique……..24

I.1.1. Equation de continuité……..24

I.1.2. Equation de quantité de mouvement……25

I.1.3. Equation de conservation d'énergie…….27

I.2.Modèle thermique utilisé……...28

I.3.Transfert de chaleur avec changement de phase…….28

Conclusion……...28

Chapitre III : Modélisation numérique

Introduction…….30

III.1.Les principales méthodes……...30

III.1.1. Méthodes à maillage mobile……..30

III.1.2. Méthodes à maillage fixe……..….30

- Méthode enthalpique……....31
- Méthode de la chaleur spécifique équivalente…….31

III.2. Présentation de la méthode des éléments finis……31

III.3. Forme générale des équations du système……...32

III.4. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis…….. .34

III.4.1. Formulation variation elle forte……..34

III.4.2. Formulation variation elle faible……....34

III.5. Discrétisation…….34

III.5.1. Terme temporelle……...35

III.5.2. Advection Terme……...36

III.5.2.1. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)…….…36

III.5.2.2.La method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)……...37

Sommaire

III.5.2.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)…….….38

III.5.3. Terme de Diffusion……...38

III.5.4. Terme source……..39

III.6.Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini…….39

III.6.1. Bilan thermique : Equation de la chaleur…….39

III.6.2. Forme discrétisée : éléments finis…….40

III.6.3.Représentation élémentaire (ou locale) du champ de Températures……..40

Conclusion……...41

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction……..43

IV.1.Logiciel d'analyse d'ANSYS……....43

IV.2.Matériaux utilisés……..45

IV.3.L'aluminium…….45

IV.4. Identification……....47

IV.5.Description du domaine d'application…….49

Conclusion……..……54

Conclusion générale…….....55

Références……56

Liste des figures

Figure I.1 : Principe fondamental de la projection thermique……...3

Figure I.2 : Schéma d'un système du procédé projection par flamme……..4

Figure I.3 : Le principe de la projection flamme fil……..6

Figure . I.4 : Le principe de la projection flamme de baguettes céramiques…….7

Figure I.5 : schéma d'un système du procédé projection par l'arc……...8

Figure I.6 : Principe de fonctionnement de l'arc fil……...9

Figure I.7 : principe de projection plasma……10

Figure I.8 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant :1 Ecoulement laminaire, 2Début de développement de turbulence, 3Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé……..11

Figure I.9 : Évolution de la température dans la tuyère (Gaz azote, gaz hélium, modélisation B,Jodoin)……12

Figure 1.10 :Mécanisme d'étalement des lamelles……20

Figure I.11 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma.....21

Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon……24

Figure III.1 : Démarche éléments finis…….32

Figure III.2 : Rationaliser approche Upwind……....36

Figure III.3 : Bilan thermique……....39

Figure III.4 :domaine plan discrétisé en élément relies eux par nœuds……...40

Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul CFD- ANSYS…….....44

Figure IV.2 : Configuration géométrique et conditions d'étalement de l'identification……..47

Figure IV.3 : représentation spatiale de la dynamique d'étalement dans les même conditions pour A **:** Expérimental de Mostaghimi **;** B : présent travail**……**48

Figure IV.4 : facteurs d'étalement……...49

Figure IV.5 : Schéma de principe du domaine**……..**49

Figure IV.6 : les profiles de température dans le temps pour quatre position dans le substrat

Liste des figures

pour a- d=0.6mm, b- d=0.8mm, c-d=1.2mm……..……52

La figure IV.7 : Les profils de température au point de contact…….52

La figure IV.8 : Distribution de la pression au point d'impact
de gouttelette avec substrat…….53

Figure IV.9 : résultats des factures d'étalement pour la goutte……..….53

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Tableau de Représentation d'équation de transport….....33

Tableau IV.1 : Propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13…….46

Tableau IV.2 : Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium. Dans les trios cas de diamètre déférent……50

Nomenclature

A : l'aire de la particule perpendiculaire à l'écoulement m^2

B : surface d'échange m^2

C_D: Le coefficient de traînée (-)

C_{ds} : Coefficient d'émission de la surface (= 1 pour un corps noir, <<1 corps brillant)

C_p: La chaleur spécifique $J.kKg^{-1}.K^{-1}$

$C_{Ø}$: Coefficient d'advection transitoire.

$C_{2Ü}$: Coefficient global réglé à 1,0.

D : l'indice de la valeur on niveau du nœud aval.

dt: Temps élémentaire en s

d_p: Le diamètre de la particule m

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en $K.m^{-1}$

dQ : Énergie élémentaire en J

E: l'émissivité de la particule (-)

F_d: La force de traînée exercée par le fluide sur la particule N

h : le coefficient de transfert thermique $W.m^{-2}.K\text{-}1$

h: longueur d'élément le long de la direction d'advection m

$\bar{k}$: La conductivité moyenne intégrée W

K : Nombre de Sommerfeld à l'impact

k_f: Paramètre de splashing d'étalement

k_{th}: La conductivité thermique $Wm^{-1}.k^{-1}$

k_n: Le nombre de Knudsen,

k_p: La conductivité thermique du matériau $Wm^{-1}.k^{-1}$

Nu : le nombre de Nusselt (-)

P : La masse volumique du fluide $kg.m^{-3}$

p_r: Le nombre adimensionnel de Prandtl (de l'ordre de 0,5 à1).

R_e: Nombre de reynolds

$S_{□}$: Termes source.

Nomenclature

T_p: La température du plasma loin de la particule	K^{-1}
Ts : La température de la particule	
t_s: Température de surface du corps	K
T_∞ : La température du plasma	K
T_a : La température ambiante	K
U : la composante axiale de la vitesse du gaz	$m.s^{-1}$
U_p: La composante axiale de la vitesse de la particule	$m.s^{-1}$.
U_R: Permet également de définir le nombre de Reynolds des particules	
μ: la viscosité du plasma	$kg.m^{-1}.s^{-1}$
V : La composante radiale de la vitesse du gaz	$m.s^{-1}$
V_R: La vitesse relative fluide/particule	$m.s^{-1}$
V_p: La composante radiale de la vitesse de la particule	$m.s^{-1}$
W^e:La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de	
W_e: Nombre de Weber	
Z: section en	(m^2)
Δ_s: La distance du point situé en amont à l'aval du noeud	m
Ø: Variable généralisée	
Δ : coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark	
λ: Le libre parcours moyen	m
γ: le terme correctif.	
$\Gamma_Ø$: Coefficient de diffusion.	
σ: Constante de Stephan Boltzmann 5.67 10-8	$W.m^2.K^{-4}$
σ_s: La constante de Stephan-Boltzmann	$K.\ m^{-2}.K^{-3}$
ρ_g: La masse volumique du gaz	kg.m-^{3}
Ɛ: Degré d'étalement	

ε_m: est le degré d'étalement maximum

Introduction générale

La projection thermique fait partie des techniques de traitements de surfaces par voie sèche. Elle regroupe plusieurs procédés qui ont tous en commun de fondre un matériau d'apport puis de le projeter sous forme de gouttelettes grâce à un gaz vecteur. En principe, tous les matériaux dont la température de fusion est séparée d'au moins 300 °C de leur température de décomposition ou de vaporisation, peuvent être projetés. Le dépôt est formé par un empilement successif de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux, ce qui conduit à une structure lamellaire. L'adhérence du revêtement est obtenue essentiellement par un phénomène mécanique et la surface des pièces est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et favoriser l'accrochage.

La projection plasma fait partie de la projection thermique qui regroupe des technologies de traitement de surface dans lesquelles un matériau finement divisé (particules de taille inférieure à 100µm, environ) est projeté a grande vitesse et dans un état fondu ou semi fondu sur la pièce a recouvrir. Une caractéristique de ce type de dépôt est sa microstructure lamellaire qui résulte de l'empilement des gouttelettes projetées sur des lamelles déjà déposées et ré-solidifiées. A l'impact, le matériau liquide se répand sur la surface et se solidifie avec une vitesse de trempe de l'ordre de ms **[1,2]**. La phase d'étalement se poursuit tant que l'énergie cinétique de la particule qui frappe la surface, n'est pas complètement convertie en énergie visqueuse et en tension de surface. Cependant des contraintes mécanique (aspérités de la surface) et thermique (front de solidification qui progresse plus rapidement que le liquide) peuvent limiter la phase d'étalement de la goutte. Une gouttelette impacte sur la surface pleine de substrat, se déforme et s'écarte à une prétendue crêpe ou à la forme éclatée**.**

Ce travail se propose les phénomènes dynamiques et thermiques qui se construisent l'étalement et la solidification de gouttelette d'aluminium sur substrat en acier

On port principalement sur l'influence des diamètres et des creux et des pics surfaciques sur l'étalement.

-Le premier chapitre est consacré à la définition des paramètres influence sur la formation des dépôts de l'injection des particules dans le jet jusqu'à la formation de lamelle c'est à dire la projection thermique est ces différentes procédés, l'écoulement du jet plasma ainsi que l'impact, l'étalement et la solidification de la lamelle sur le substrat.

-Le deuxième chapitre, est dédié à la présentation des équations des modèles thermique et dynamique du problème étudié pour expliquer le physique des écoulements diphasique des fluides non miscible.

-Le troisième chapitre, est consacré à la résolution numérique en présentant les différentes méthodes de résolution et la présentation de la méthode de discrétisation par élément fin ainsi que la méthode de calcul VOF.

-Dans **le quatrième chapitre** on va présenter les résultats de simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact et la solidification des gouttes.

Ce travail se termine avec une conclusion générale.

Chapitre I :

Etude bibliographique

Introduction

Dans ce chapitre en présentant la définition de projection thermique avec les applications et les principes des différents types, ainsi que les domaines d'utilisation et les phénomènes intervenant lors de la projection des particules.

I.1. La projection thermique

La projection thermique fait partie des techniques de traitement de surface par voie sèche. Cette technique permet de réaliser des revêtements épais (généralement de quelques dizaines de micromètres à quelques centaines) de natures très variées sur des substrats (pièce à revêtir) tout aussi variés.

Tous les systèmes de projection thermique possèdent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter jusqu'au substrat de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) qui peuvent être à l'état liquide, pâteux voir solide. Ce gaz vecteur peut être aussi source enthalpique, permettant de chauffer ces particules jusqu'au point de fusion. D'autres procédés utilisent un arc électrique pour fondre le matériau.

Les particules ainsi projetées sur le substrat s'écrasent selon leur vitesse, état physique, température etc. L'accumulation des particules sur le substrat permet de réaliser le revêtement **[3].**

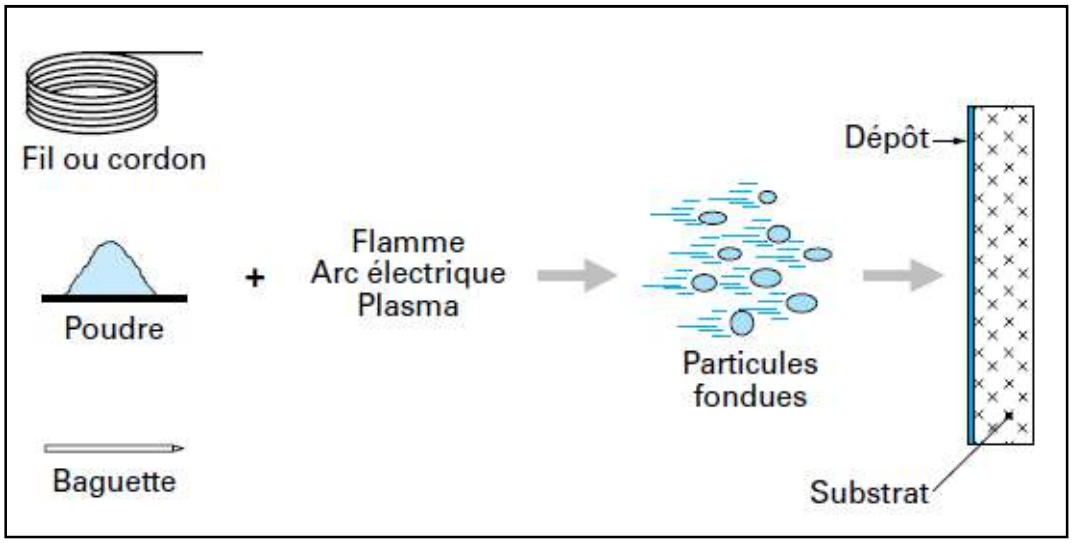


Figure I.1 : Principe fondamental de la projection thermique.

I.1.1. La projection à la flamme

La projection à la flamme fait partie d'un groupe plus large de processus de revêtement appelé projection thermique. De nombreux matériaux peuvent être déposés en tant que revêtement à l'aide de ce processus.

Ce procédé permet de réaliser des dépôts de quelques dixièmes à plusieurs millimètres d'épaisseur avec un taux de porosité de 2 à 15%.
La vitesse des particules peut atteindre 100m/s, la résistance d'arrachement du revêtement jusqu'à 50 MPa. Procédé très utilisé pour l'anticorrosion.
Procédé de projection thermique dans lequel la chaleur nécessaire à la fusion du produit d'apport est obtenue par la combustion d'un mélange d'oxygène avec le gaz

combustible considéré (flamme oxygaz), le produit d'apport fondu étant ensuite projeté sur la pièce par un fluide véhiculaire (air comprimé).

Le produit d'apport est sous forme de fil ou de poudre, Cette technologie peut être utilisée pour :
-La reconstruction / Réparation.
- La résistance à la corrosion.
- La résistance à l'esure **[4].**

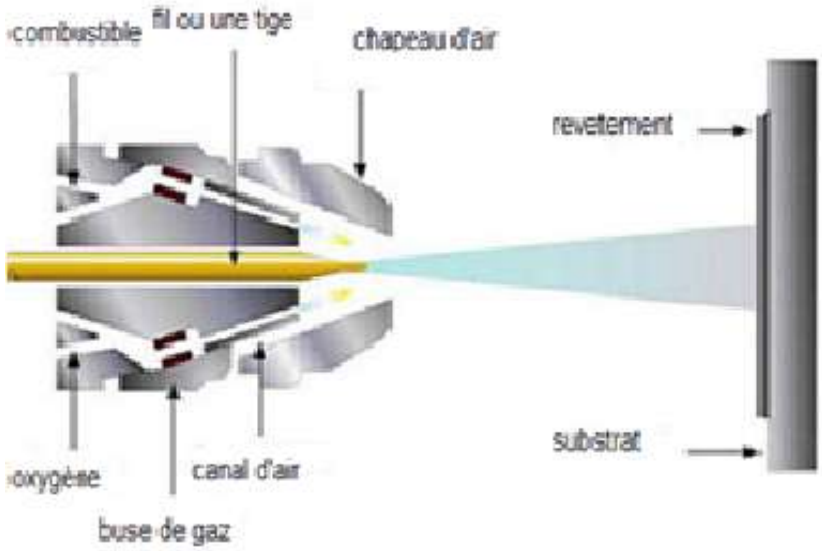


Figure I.2. schéma d'un système du procédé projection par flamme.

- **Flamme simple**

On utilise un chalumeau. Cette technique est très simple et très répandue dans l'industrie, mais elle est limitée en température et en vitesse de projection. Il est possible de projeter indifféremment le matériau sous forme de poudre ou de fil. Ce procédé utilise la combustion d'un gaz pour projeter le matériau d'apport sur le substrat **[5].**

- **HVOF ou Flamme supersonique**

  - **Projection hvof**

HVAF (High Velocity air carburant) la technologie de pulvérisation thermique est similaire à HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) en ce qu'une source de combustible est brûlé pour permettre à l'agent de propulsion pour accélérer les particules de poudre de revêtement. Cependant, HVAF diverge de HVOF en ce qu'utilise de l'air comme source d'oxygène, ce qui élimine le besoin d'oxygène de la bouteille sous pression. La combustion à basse température de HVAF chauffe les particules de poudre pulvérisée moins, contrôlant ainsi l'altération thermique du revêtement. HVAF a la possibilité de

générer des revêtements HVOF-comme et revêtements similaires à ceux produits en utilisant pulvérisation à froid. La technologie HVAF est bien adaptée pour les revêtements de carbure de tungstène sur le corps de pompe et essieux pour les industries pétrolières et gazières. HVAF est couramment utilisé comme une technologie de réparation pour les industries de forage de pétrole et de gaz **[5].**

  - **Projection hphvof**

La projection supersonique HP HVOF permet de réaliser des dépôts de 0,05 à 1 mm d'épaisseur. De telles performances peuvent être atteintes car le dépôt est en compression et sans porosités. La suite de la projection HP HVOF **[6]**.

- **Projection flamme poudre**

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%.

La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Un des principaux avantages des pistolets de projection flamme poudre par rapport au pistolet de projection flamme fil est lié à la plus grande variété de revêtements disponibles due au fait que la plupart des matériaux sont disponibles sous forme de poudres. Le procédé de projection flamme poudre est seulement limité par les matériaux qui ont une température de fusion supérieure à celle de la flamme ou alors dans le cas où le matériau projeté se décompose à la chaleur.

Des revêtements de polymères peuvent aussi être réalisés par projection flamme **[7].**

- **Projection flamme fil**

La projection flamme fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par la suisse Schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils métalliques. L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûleur. Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisait et propulsait le métal fondu. La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu.

Schoop résolut ce problème en utilisant une turbine qui actionnait un système d'engrenages et de molettes qui tirait le fil dans la tuyère du brûleur. Cette appareillage lui apparu similaire à un pistolet, depuis c'est pour cette raison que l'on parle de « pistolets » de projection thermique et rarement de « torche ». Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure du dessous. Le concept de Schoop basé sur la projection de métal sous forme de fil correspond au démarrage de l'industrie de la projection thermique.

On peut constater que de nos jours le pistolet de projection flamme fil n'a que peu

changé par rapport à celui utilisé du temps de Schoop. Bien qu'il y a eu des changements au niveau de la géométrie de la buse du brûleur et de l'injecteur d'air, le remplacement de la turbine à air par un moteur électrique, le principe reste le même système « tirer-pousser un fil dans une flamme, le fondre et l'atomiser et déposer les gouttelettes de métal fondu sur le support pour le revêtir avec un dépôt adhérent ».

Ce type de procédé de projection thermique a été très largement utilisé et l'est encore aujourd'hui pour les travaux de réparation d'éléments de machine et la protection contre la corrosion.

Ses avantages sont qu'il est d'un investissement faible, il est facile d'utilisation en permettent l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier. Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtements à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence

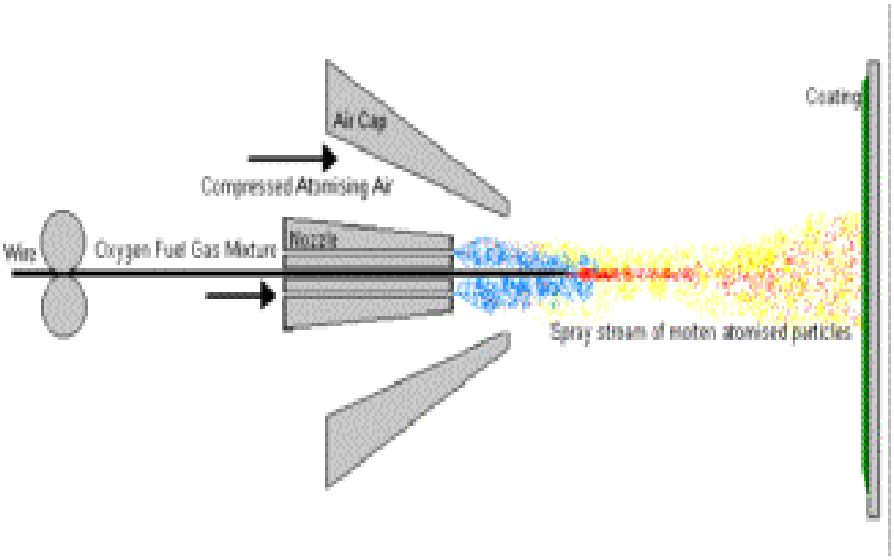


Figure I.3. Le principe de la projection flamme fil **[8].**

➢ Projection flamme baguettes céramiques

La projection flamme de baguettes en céramique date du début des années 50 au moment de la demande de revêtements réfractaires résistant à la chaleur. La projection plasma était très peu développée et les revêtements obtenus par projection flamme à cause de leur forte porosité et leur faible cohésion ne pouvaient répondre aux besoins demandés. La solution fut « assez simple » ; CoorsCeramic et Norton développèrent des baguettes céramiques sous le nom de Rokide et pendant le même temps Metallizing Engineering Company (Mogul) modifia un pistolet de métallisation flamme fil pour projeter les baguettes.

La modification portait essentiellement sur le design des mollettes de guidage pour pincer les baguettes céramiques et les faire avancer dans la flamme du brûleur, le principe de fonctionnement du pistolet développé par Schoop restant inchangé, la flamme étant concentrique au fil ou à la baguette de céramique pour assurer une parfaite fusion uniforme du matériau projeté.

Un flux d'air comprimé soufflant autour de la flamme atomise le matériau fondu et le projeté sur la pièce à revêtir. La vitesse des particules dans le procédé de projection de baguettes céramiques (tout comme dans la cas de la projection flamme fil) est de l'ordre de 185 m/s, ce qui conduit à des revêtements de densité voisine de 95 %. Les compositions des céramiques disponibles sur le marché incluent les zircones stabilisées, l'alumine, les spinelles, la mull ite ou l'oxyde de chrome.

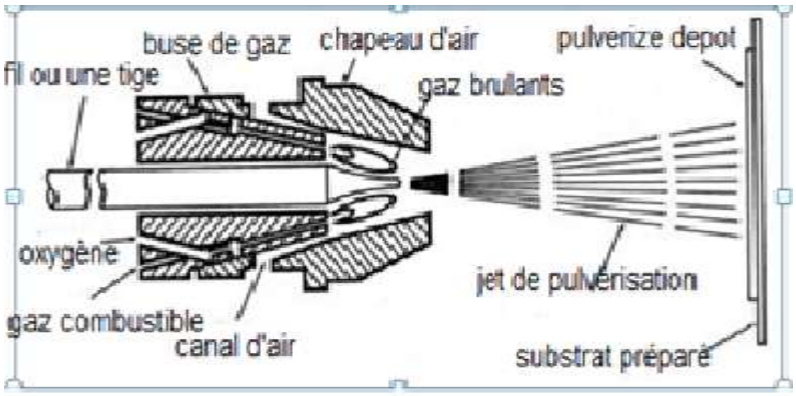


Figure. I.4. Le principe de la projection flamme de baguettes céramiques **[9].**

➢ Canon à détonation

Le principe de la projection par canon à détonation consiste à utiliser la détonation ou les ondes de choc résultant de l'explosion contrôlée d'un mélange oxygène / carburant pour fondre et projeter la poudre des matériaux sélectionné sur la pièce à revêtir.

Le système est complexe. En opération un mélange de la poudre à projeter, d'acétylène et d'oxygène est injecté dans la chambre de détonation qui débouche sur une tuyère d'un mètre de long et 2,5 cm de diamètre comme illustré sur le diagramme suivant. Les gaz de combustion peuvent être neutre, oxydants ou réducteurs, leur température peut être contrôlée soit par ajout de gaz neutre pour les refroidir ou soit par ajout d'hydrogène pour les réchauffer. Un mélange poudre / gaz mesuré et contrôlé automatiquement est injecté dans la chambre d'explosion avec un système de soupapes et allumé avec une bougie. L'onde de choc résultante accélère les particules de poudre jusqu'à environ 750 m/s et produit des températures pouvant atteindre 4000°C. La pression générée par la détonation ferme les soupapes de contrôle jusqu'à ce que la pression dans la chambre soit uniforme. A la suite le cycle est répété entre 4 et 8 fois par seconde. Entre chaque cycle la chambre est purgée à l'azote ou à l'air comprimé. Chaque détonation dépose une couche très dense et très adhérente de plusieurs microns d'épaisseur et d'environ 2,5 cm de diamètre. La répétition des cycles conduit à des revêtements épais. Un tel équipement génère beaucoup de bruit, environ 150 dBA, et doit être utilisé dans une cabine insonorisée **[10].**

I.1.2. Projection par arc

➢ Projection arc électrique entre deux fils

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat (figure)

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A. Ils comprennent deux parties :

une partie entraînement du fil.

une partie fusion/projection du métal fondu.

Les fils sont conditionnés en bobines ou en fûts et sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques ou par des turbines à air. Dans le cas de fils très rigides ou de grandes

distances entre pistolet et bobines (supérieures à 6 m), il est nécessaire d'adjoindre à l'installation un système entraînement des fils par poussée.

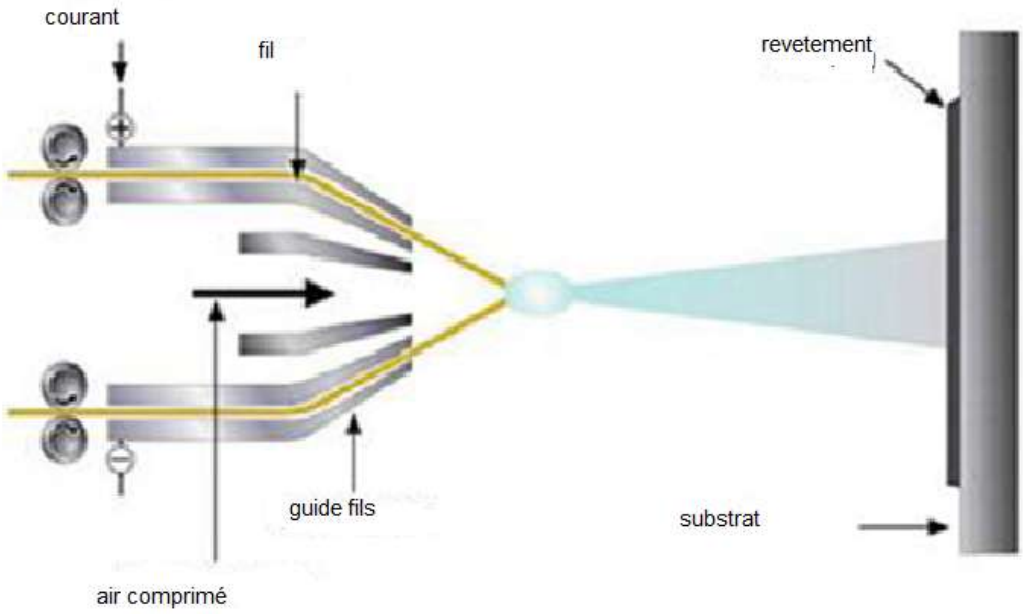


Figure I.5. : Schéma d'un système du procédé projection par l'arc **[11].**

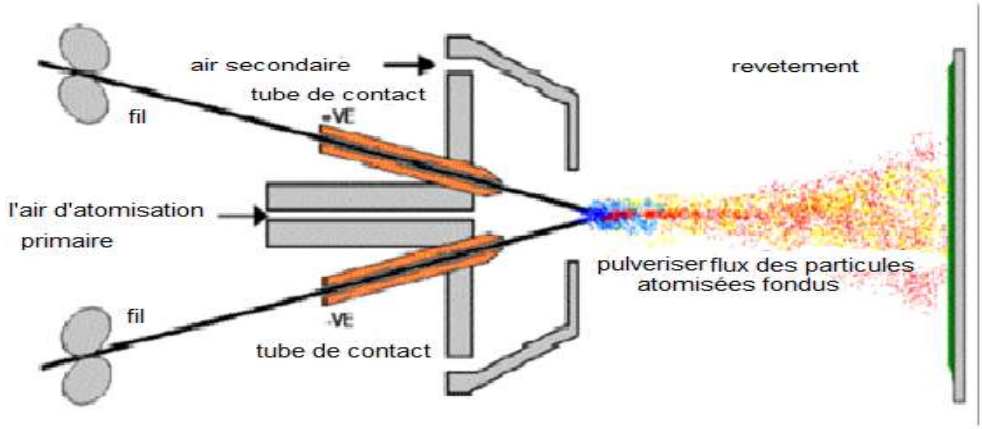
➢ Projection arc fil

Le procédé de projection arc-fil ou arc-électrique consiste à créer un arc électrique entre deux électrodes consommables des matériaux du revêtement pour le fondre et ensuite par l'intermédiaire d'un gaz à atomiser et projeter sur le support à revêtir la gouttelette de métal fondu.

Le pistolet est relativement simple. Deux guides dirigent les fils au point d'arc. Derrière ce point une buse dirige un jet d'air ou de gaz sous pression pour atomiser le métal fondu et le projeter sur la pièce à revêtir. Ce principe est illustré sur le diagramme suivant. Des générateurs fonctionnant à 450 ampères peuvent projeter jusqu'à 40 kg/h de matière. Les systèmes de projection arc électrique sont approvisionnés en fil avec des moteurs pneumatiques ou électriques ; des systèmes « tiré poussé » ou « poussé » existent sur le marché.

Les facteurs influençant la qualité des revêtements sont d'une part le matériel de projection utilisée et d'autre part la qualité du fil utilisé (finition, dureté, tension, composition chimique exacte et diamètre). Un diamètre de 1,6 mm est recommandé (pour l'utilisation d'un pistolet classique) car il permet une bonne finition avec un débit d'air pas excessif.

Un avantage de cette technique de projection peut être la possibilité de projeter deux fils de compositions différentes pour obtenir des pseudos alliages. Un exemple est, en travaillant avec une bobine de fil cuivre et une bobine de fil étain, la réalisation de revêtements d'alliage cuivre étain avec une parfaite distribution homogène des deux constituants dans le revêtement. Aussi le développement des fils fourrés a permis la réalisation de revêtements d'alliages complexes comme les MCrAlY ou les alliages contenant des carbures



.

Figure I.6. Principe de fonctionnement de l'arc fil **[12].**

➢ Plasma d'arc soufflé

Les torches à plasma d'arc soufflé utilisent le confinement d'un arc électrique pour augmenter fortement sa température (Le cœur du dard plasma se situe généralement entre 6000°K et 14000°K, il ne faut pas oublier qu'une grande partie du jet est à température bien moindre) de façon à générer un plasma à partir d'un gaz plasmagène. Ce plasma sert ensuite à fondre et à accélérer le matériau à projeter. Selon le mélange de gaz utilisé les propriétés du plasma varient permettant de modifier la conductivité thermique (transfert de la température au matériau - il ne faut pas oublier que le temps de séjour reste très faible et que si la conductivité est insuffisante le temps de séjour ne suffira pas à fondre le matériau) ou de modifier la viscosité du jet (vitesse des particules). Ainsi les gaz les plus couramment utilisés en projection thermique plasma sont l'argon, l'hydrogène, l'hélium et l'azote. L'argon et l'hélium sont recherchés pour leur viscosité tandis que l'hydrogène, l'hélium et l'azote sont recherchés pour la conductivité. Ainsi un plasma d'argon est très peu efficace pour chauffer un matériau sauf pour les très bas points de fusion comme le zinc, il lui est alors généralement ajouté de l'hydrogène pour permettre de fondre la plupart des matériaux.

Trois milieux de projection sont utilisés suivant les caractéristiques souhaitées du revêtement :

Dans l'air sous pression atmosphérique (APS, Atmosphérique Plasma Spraying). Le plus courant.

Dans un gaz neutre (souvent l'argon) à la pression atmosphérique (IPS, Inert Gas Plasma Spraying). Permet de projeter des matériaux fortement oxydant et augmente la température de l'écoulement, l'intérêt de cette technique réside principalement à la réalisation de revêtements sur substrats trop sensibles thermiquement. Des machines à plus hautes pressions ont été développées comme le CAPS pouvant atteindre environ 3 bars sans trouver réellement de débouchés.

Dans un gaz neutre à faible pression (100 mbar) (LPPS, Low Pressure Plasma Spraying). Augmentation de la vitesse de projection et donc de la densité et de l'adhérence du dépôt tout en évitant l'oxydation du matériau d'apport et du substrat.

Des développements sous très faibles pressions (environ 1mbar) sont en cours d'industrialisation visant à allier les caractéristiques des techniques de type PVD et la productivité du procédé plasma **[5].**

I.1.3.Matériaux d'apport

Un très grand nombre de matériaux sont utilisables avec l'ensemble des techniques ou avec une en particulier en forme de poudres, fils ou cordons. Tous matériaux peuvent être projetés. Cependant, les matériaux qui fondent en se décomposant tels que l'hydroxy apatite ou YBCO ou ceux qui n'ont pas point de fusion, tel que graphite doivent être préparés avec plus de précautions. Soit par l'optimisation de paramètres de la projection (hydroxy apatite partiellement fondu), soit par une préparation de poudres avec les particules enrobées (graphite enrobé par nickel). Plusieurs matières organiques peuvent être projetées par les torches appropriées. Les métaux et les céramiques sont traditionnellement fréquemment employés, ils peuvent aussi être utilisés en de composites pour modifier les propriétés du revêtement. Par exemple, les composites de carbures WC avec Co ou Ni sont très souvent projetés. La particularité du WC Co est une forte augmentation de la dureté de la pièce de l'ordre de 900 à 1000 HV 0.3 **[13].**

I.1.4.Projection plasma

I.1.4.1.Définition

Le jet de plasma est généré par l'arc électrique qui s'établit entre une électrode intérieure à la torche de coupage et la pièce. Le mélange gazeux ionisé à la sortie de la tuyère forme le plasma. Le pouvoir calorifique du jet (environ 18 000°C) provoque une fusion quasi instantanée qui se propage dans toute l'épaisseur de la pièce. Sur une machine de découpe plasma, la température extrêmement élevée fait fondre instantanément le métal tandis que le gaz sous pression chasse au fur et à mesure les gouttelettes de métal en fusion. L'usage de la torche de découpage au plasma doit se faire impérativement dans des locaux spécialement ventilés ou en plein air à cause de dégagement de gaz toxiques généré par les très hautes températures de travail.

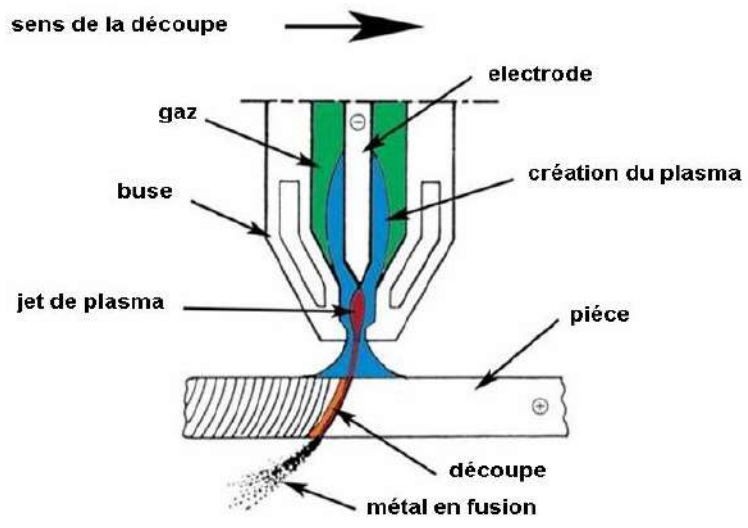


Figure I.7.principe de projection plasma **[15].**

I.1.4.2. Ecoulement du jet plasma

La Figure I-8 schématise l'écoulement du jet plasma dans l'atmosphère. Le jet formé dans la chambre d'arc (zone 1) sort avec une grande vitesse (500 à 2500 m.s-1) et entre en contact avec le gaz environnant froid et au repos (zone 2). La différence de vitesse entre le jet et les gaz froids environnants engendre, à la frontière du jet, la formation de tourbillons d'instabilités, appelés "tourbillons de Kelvin-Helmotz". Ces tourbillons grossissent en se déplaçant vers l'aval et l'écoulement devient turbulent. Ils engouffrent le gaz ambiant sous forme de bulles qui gardent, dans un premier temps, une masse volumique et une inertie supérieures (plus d'un ordre de grandeur) à celles du gaz plasmagène. Ces bulles, progressivement chauffées par le plasma, se cassent dans le jet en structures de plus en plus petites et augmentent le caractère turbulent au sein de l'écoulement (zone 3). Lorsque ces turbulences atteignent l'axe du jet, celui-ci perd son caractère laminaire. Il devient alors pleinement turbulent et l'entraînement croissant du gaz ambiant contribue à réduire sa vitesse et son enthalpie (zone 4).

Le plasma est donc sujet à diverses instabilités dont les temps caractéristiques diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. Le plasma peut être observé à deux échelles de temps différentes :

- Entre 10^{-3} s et 10^{-4} s , le jet est fluctuant, du fait des instabilités du pied d'arc. L'effet non Négligeable de ces fluctuations sur le traitement thermocinétique des particules a été étudié par
- Entre 10^{-1} s et quelques secondes, le jet de plasma est globalement stable. C'est en général ce que L'on considère pour déterminer les transferts plasma-particules contrôlant la projection **[15]**.

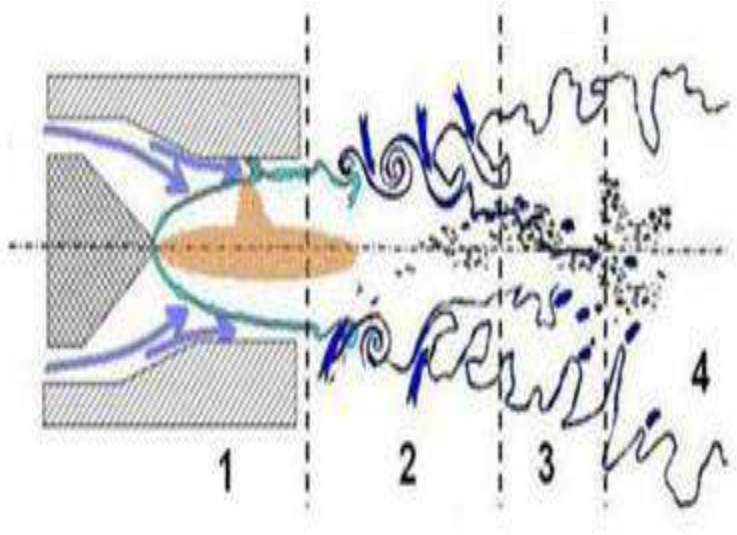


Figure I.8. Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1

Ecoulement laminaire, 2Début de développement de turbulence, 3Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé

➢ Modélisation De l'écoulement

Connaissant le nombre de mach, on peut alors appliquer d'autres équations au cas spécifique de la zone de sortie de tuyère **[16] :**

- **Température de l'écoulement**

La théorie isentropique unidimensionnelle donne en sortie de tuyère :

Ici

T_o/T_e=4.15 en azout et

T_o/T_e=9.74 en hélium

Ici T est la température du gaz au point considéré de la tuyère, T'est la température du gaz

En sortie de tuyère, T_0 est la température d'introduction du gaz dans la tuyère.

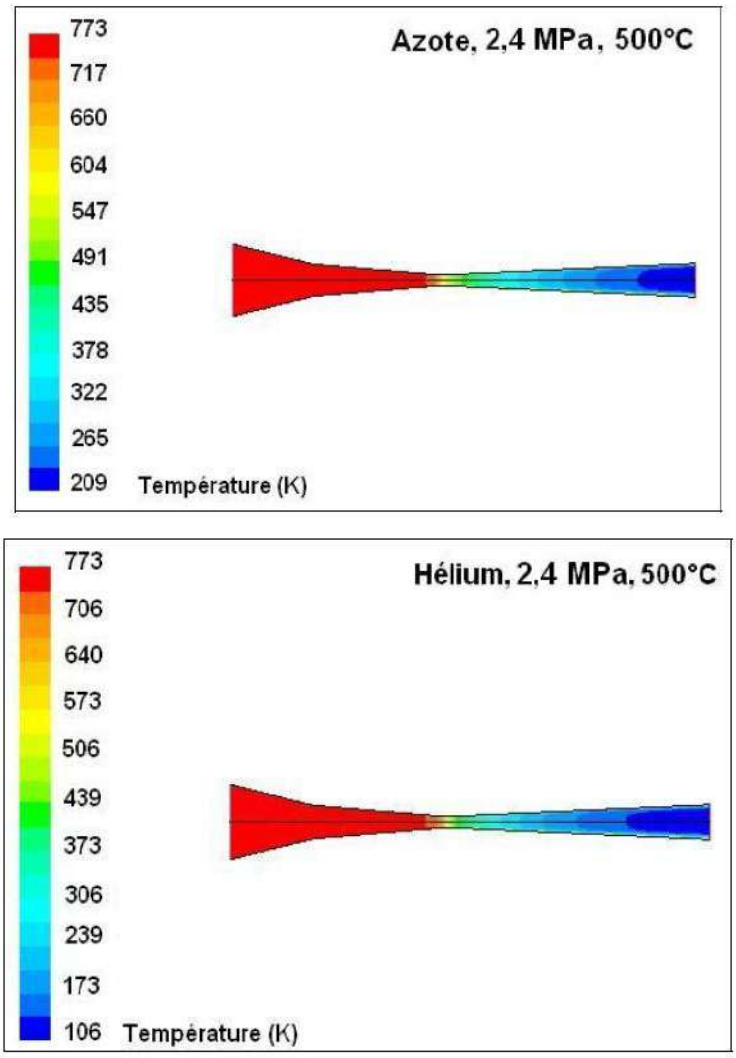


Figure I.9.Évolution de la température dans la tuyère (Gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin) **[17].**

- **Pression et débit de gaz**

Durant la projection, l'air d'atomisation et l'air ambiant entraine par le jet de gaz peuvent provoquer une oxydation des particules en fusion. L'augmentation de la pression du gaz d'atomisation se traduit par une augmentation de la vitesse du gaz de telle sorte que les particules atomisées sont plus fines et réagissent plus fortement avec l'oxygène à cause de leur plus grande surface spécifique**.** Ceci entraine un

accroissement des inclusions d'oxydes et de la perte éventuelle de carbone dans le dépôt, mais conduit a une diminution de la porosité

En général, des pressions d'atomisation élevées conduisent a des lamelles moins épaisses et une densité de dépôt plus élevée, parce que des particules plus fines (<30µm) atteignent des vitesses plus élevées (>100m/s). Pour la même raison, des pressions d'atomisation plus élevées (>0,4MPa) entrainent une diminution de la rugosité du dépôt et généralement une meilleure cohésion de celui-ci et une meilleure adhérence au substrat **[18].**

Cependant, l'augmentation de la pression d'atomisation peut aussi avoir un effet néfaste sur la qualité du dépôt. En effet, lorsque les particules atteignent une vitesse trop importante (>100m/s), ce qui arrive pour des pressions élevées, elles explosent au contact de substrat et cela se traduit par une diminution du rendement de projection. De plus, la différence de la projection par flamme ou par plasma, la projection a l'arc électrique utilise un 38 gaz froid qui au lieu de chauffer les particules les refroidit considérablement. Aussi, une augmentation de la pression d'atomisation doit s'accompagner d'une réduction de la distance de projection pour conserver un état de fusion des particules satisfaisant a l'impact **[19].**

- **Vitesse de l'écoulement**

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

$E_{ci}=1/2m_g v_1^2$

Tout au long de l'écoulement, jusqu'à stabilisation du système, cette énergie évolue par conversion en d'autres types d'énergies jusqu'à dissipation totale de l'énergie cinétique afin d'atteindre l'état stable [**19].**

I.1.4.3.La torche à plasma

La torche à plasma ou procédé de vitrification serait un moyen possible de traitement thermique de certains déchets. Elle permettrait d'atteindre de très hautes températures (de 8000 à 14000K), supérieures aux méthodes conventionnelles (gaz, charbon…). Ce procédé est présenté comme une alternative à l'incinération et au compostage, mais est utilisé, pour l'instant, comme un complément de l'incinération. Il rend inertes les cendres toxiques résultant de l'incinération **[20].**

I.1.4.3.1. Description du fonctionnement du plasma

1-Création d'un arc électrique

Entre une électrode en tungstène ou en zirconium et la pièce à couper, un arc électrique est créé. L'arc est très localisé.

2-Ouverture du gaz ou du mélange plasmagène

Graceà une convection forcée au travers d'un orifice de faible diamètre, l'arc et le gaz sont dirigés sur une zone très précise. Le gaz devenu PLASMA dont le débit est suffisant, permet de chasser le métal en fusion.

3-Découpe

Après l'amorçage et le début de la coupe, il suffira de garder une hauteur constante, manuellement ou automatiquement sur certaines installations (machines de découpes) et de se déplacer pour effectuer la découpe voulue **[21].**

I.1.4.3.2 Amorçage de l'arc

L'amorçage de l'arc est assuré par une surtension, supérieure à une tension critique appelé tension de claquage, appliquée entre les deux électrodes. La valeur de cette tension de claquage dépend de la nature du gaz plasmagène, de la pression et la distance inter-électrodes**.** Cette surtension (6 à 10 kV) est appliquée à l'aide d'un circuit haute fréquence (plusieurs MHz) en série ou en parallèle avec l'arc et le générateur de courant. L'argon est souvent utilisé à l'amorçage car il érode peu les électrodes et qu'il s'ionise à plus faible énergie que les autres gaz plasmagènes (N2, H2, He) **[22].**

I.1.4.3.3.La nature des gaz plasmagènes

La nature des gaz plasmagènes influe directement sur les traitements thermiques et cinétiques des particules. Le choix de ces gaz dépend de la température et de la difficulté de fusion ainsi que de la densité de la matière à projeter. Les gaz les plus couramment employés sont l'argon, le diazote, le dihydrogène, l'hélium et l'oxygène d'argon est courante car ce gaz lourd confère au gaz plasmagène une quantité de mouvement plus importante que les autres gaz : il pousse le pied d'arc et accélère les particules. L'apport de dihydrogène dans le mélange permet d'accroître la conductivité thermique du plasma et donc d'améliorer le transfert de chaleur plasma-particules. L'utilisation d'hélium accroît la conductivité thermique, ce qui retarde le refroidissement du plasma par diffusion des inclusions d'air. Le choix du mélange plasmagène est donc l'objet d'un compromis entre transfert cinétique et transfert thermique plasma-particules. Il est déterminant pour une bonne fusion et accélération des particules **[23].** Il a également une influence sur le déplacement du pied d'arc à l'anode. L'ajout d'un gaz de masse élevée (Ar ou N2) possédant une quantité de mouvement suffisante pour accroître les forces de traînée qui repoussent l'arc en aval de la tuyère ce qui permet de limiter l'érosion de l'anode et d'augmenter sa durée de fonctionnement. Les céramiques, matériaux à hauts points de fusion, nécessitent des plasmas plus énergétiques. L'hydrogène est habituellement utilisé comme gaz secondaire en mélange avec l'argon, dans des proportions pouvant atteindre 25 % en volume car sa viscosité (μ_{10000K} = 3,1 kg/m.s) et sa conductivité thermique (k_{10000K} = 3,7 W/m.K), dans la gamme de température des plasmas, permettent de meilleurs transferts thermiques **[24].**

I.1.4.3.4.Injection des gaz

À la fin de la mise sous vide, le sac est prêt à être scellé. Avant de sceller le sac, vous pouvez injecter un gaz alimentaire. Cette technique est appelée MAP (emballage sous atmosphère modifiée). En général cette technique est utilisée pour augmenter la durée de conservation du produit, pour donner une protection supplémentaire et/ou pour empêcher la coloration du produit. Le plus souvent, on utilise un mélange d'azote (N2) et de dioxyde de carbone (CO2). L'Oxygène (O2) peut également être ajouté à cette combinaison. Récemment, l'utilisation de l'argon (Ar) a augmenté car ce gaz contient les mêmes propriétés de gaz que l'azote (N2**) [25].**

I.1.4.3.5.Formation du jet plasma

Nous présentons des simulations numériques de formation de jet de plasma à l'aide d'un nouveau code de dimension 2,5 MHD, en utilisant le concept de vent artificiel qui permet de construire des systèmes de capture de choc contre le vent simples. Tout d'abord, nous étudions le processus de formation d'un jet de plasma par la collision de deux ondes de choc se propageant à un certain angle entre les fronts et nous comparons nos résultats avec la théorie. Nous avons constaté que trois cas il semble pour la formation de jet: (1) Chaleur dominée, (2) Jet-Heat, et (3) Jet dominée cas, en fonction des paramètres de l'angle de collision et la vitesse de choc. Nous avons également constaté que, même dans le cas où les deux flux derrière les fronts de choc collision sont tous les deux un sous-sonique, le jet de plasma supersonique apparaît toujours là. Ensuite, nous étudions le processus de génération de jet de plasma supersonique en cas de collision directe de deux tubes de flux magnétiques.

Nous avons constaté que des jets de plasma ultra-soniques apparaissent dans une large gamme de paramètres. De nombreuses pistes de paramètres nous avons conclu qu'il ya trois paramètres physiques importants régissant la condition de formation de jet supersonique, à savoir, la vitesse de collision, l'angle de collision et la densité dans les tubes de flux. La condition la plus importante d'entre elles est que la densité dans les tubes de flux collision dépasse environ 50 fois la densité du fond. Nous avons également constaté que les jets de plasma supersoniques peuvent être générés par la reconnexion magnétique, lorsque deux tubes de flux magnétiques avec des densités d'environ 9 fois plus élevé que leur entourage sont en collision. Nos résultats aideront à mieux comprendre la dynamique complexe de la région de transition solaire **[26].**

I.2.Traitement des particules dans le jet plasma

Le traitement des particules est conditionné par les transferts de quantité de mouvement, de chaleur et de masse entre le plasma et les particules. Ces transferts dépendent des champs de température et de vitesse de l'écoulement, de la nature du mélange de gaz ainsi que de l'état des couches limites cinématique et thermique qui se forment autour de la particule **[27].**

L'accélération et le chauffage des particules dépendent :

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

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

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

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

L'engouffrement d'air dans le plasma, ainsi que la phase d'injection sont des mécanismes induisant une large dispersion des trajectoires des particules dans le jet et donc une importante disparité de leur traitement thermique. Dès leur injection, les particules les plus grosses traversent le jet plasma et se retrouvent rapidement sur le bord inférieur. Durant leur court temps de séjour à travers le cœur du plasma, elles sont au mieux juste fondues en surface et la plupart ne sont pas traitées.

Ceci s'explique par le fait que plus une particule est grosse, plus sa capacité thermique est élevée et plus elle a besoin de temps pour être traitée.

Dans le cas des particules massives partiellement fondues en surface, elles se refroidissent et commencent à se solidifier rapidement après avoir quitté le cœur du plasma.

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

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

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

Un bon transfert thermique est capital pour obtenir des dépôts offrant de bonnes qualités (densité, rigidité,…). En effet, les particules, pour s'écraser et accommoder toutes les irrégularités de la surface (en particulier pour réduire la porosité), doivent être fondues à l'impact avec des vitesses élevées (si possible > 300 m/s).

C'est pourquoi, les plasmas contenant de l'hydrogène sont intéressants, car du fait de leur importante conductivité thermique dès 4000 K, ils améliorent grandement le transfert thermique**[27].**

I.2.1. Injection de la poudre

Le moulage par injection de poudres métalliques consiste à réaliser des composants métalliques par injection d'un mélange de poudre métallique et d'une résine polymère thermoplastique, laquelle est ensuite évacuée par déliant âge thermique ou catalytique.

Enfin, le squelette de poudres est densifié, le plus souvent par diffusion à l'état solide. Les principaux problèmes survenant lors de ce procédé proviennent des effets de séparation de phase lors de l'injection, des effets de soudure d'écoulements et de la distribution hétérogène de poudres métalliques après injection, provoquant des retraits non homothétiques lors de la phase de densification. Un pilote expérimental instrumenté permettant la réalisation de l'ensemble des étapes a été mis en œuvre. La théorie des mélanges est utilisée pour modéliser la phase d'injection de polymère chargé en poudres. La résolution des équations de conservation par la méthode des éléments finis permet la localisation des zones de ségrégation. Une méthode de propagation de fronts a été développée permettant la simulation du remplissage de moule. Enfin la densification par diffusion à l'état solide est modélisée et simulée numériquement à l'aide d'un modèle visqueux non linéaire **[28].**

I.3.Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement

La couche limite qui se développe autour de la particule se caractérise par un gradient important de température, la différence de température entre le gaz et la surface du

particule peut atteindre 1000 K , ce qui se traduit par des phénomènes de diffusion dans la couche limite et implique un écart à l'équilibre chimique fonction de l'ordre de grandeur des vitesses des réactions chimiques vitesse de diffusion **[29].**

➢ Transfert de quantité de mouvement

Les forces qui s'exercent sur les particules dans le jet plasma et qui régissent leurs trajectoires sont principalement :
-la force de traînée : c'est la force la plus importante, elle peut être modifiée par l'évaporation de la particule et des effets de non continuité de la couche limite.
- la force de masse ajoutée : elle traduit l'accélération du fluide environnant due à l'accélération de la particule. Elle est exercée par le volume du fluide déplacé par la particule.
- la force liée à la rotation de la particule, résultat d'un gradient de vitesse de mouvement relatif jet plasma-particule :
- La force de thermophorèse : liée au gradient de température dans la couche limite qui y induit des gradients de concentration **[29].**

I.4.Substrats

Dans le cas de la projection thermique, l'état physico-chimique de la surface du substrat joue un rôle très important sur la structure des lamelles, la formation du dépôt et, par conséquent, son adhérence. Cette propriété est un critère de qualité important, car il est en7 R: rendement de projection 44 effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas a son substrat **[30 ,31].**

I.4.1.Préparation de substrat

Les techniques de préparation de surface doivent permettre de nettoyer les matériaux et de modifier l'état géométrique de leur surface. La réalisation d'un dépôt par projection thermique impose de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi **[32,33]** : un dégraissage qui consiste a débarrasser la surface des films passivant et des graisses.

C'est la première étape de préparation des pièces destinées à être revêtues. En effet, elle a pour conséquence la destruction et l'élimination de la plupart des impuretés (graisses, inclusions superficielles, etc.) généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements ; un traitement mécanique appelé sablage ou pro jetage qui permet la création d'un état de surface rugueux. Apres le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité la surface a revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou a l'état pâteux devenir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

Outre la création d'une grande surface d'adhérence, la rugosité permet également de diminuer les contraintes résiduelles générées au sein du dépôt en empêchant leur addition par la séparation des grains écrases, notamment pour les contraintes parallèles au substrat qui tendent a provoquer le décollement des dépôts.

En contrepartie, cependant, le sablage crée des contraintes de compression dans le substrat au voisinage de la surface sablée. Le sablage se fait généralement a l'aide de particules d'abrasifs, le plus souvent de l'alumine, entrainées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat. Un nettoyage ultérieur (par ultrasons et solvant par exemple) est indispensable pour éliminer les particules de sablage incrustées dans les creux et toute trace dégraisse (introduite par exemple par l'air de sablage).

I.4.2.Ecrasement des particules sur le substrat

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule. L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement **[34].** L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes: impact initial, étalement de la particule et refroidissement et solidification.

A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse, il a été observé pour des particules d'alumine que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) se passe toujours si leur nombre de Sommerfeld K [7] est supérieur à 70 et parfois quand 10<K<70.

Cet éclaboussement croît en fonction de K et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3 mm, c'est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène.

L'étalement des particules (de l'ordre de la microseconde) est un phénomène complexe notamment quand la solidification de lamelles commence avant l'étalement complet. Les phénomènes intervenant dans cette étape sont gouvernés par plusieurs facteurs qui peuvent être classés en deux groupes : les propriétés des particules à l'impact (la diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l'état physico-chimique,et l'état de la surface du substrat où des particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques, l'oxydation **[34].**

I.4.3.Construction du dépôt

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire comportant éventuellement des oxydes, des microporosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites. La manière dont les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité. Par ailleurs, la formation des lamelles peut s'accompagner d'un phénomène d'éclaboussure à l'impact ou a la fin de la phase d'étalement. Les mécanismes d'étalement et de solidification des particules sont relativement complexes, car ils dépendent de l'énergie cinétique et thermique des gouttelettes, de leur viscosité et de leur mouillabilité vis a vis du matériau substrat, de la nature et de l'état de surface du substrat ainsi que de sa température. Le phénomène d'éclaboussure peut être réduit en diminuant la taille des gouttelettes et/ou leur vitesse d'impact en d'atomisation ou sur la geometrie des buses. jouant sur le débit du géométrie **[30].**

➢ Modélisation numérique de l'impact d'une particule fondue sur une surface solide avec transfert thermique

L'étude de l'impact d'une particule liquide trouve son intérêt dans de nombreuses applications : par exemple, dans l'aéronautique, l'industrie d'automobile, le génie chimique, le génie métallurgique etc. L'étude, réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat soutenue par Zhigang Feng à l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard, s'intéresse à la modélisation numérique de l'impact d'une particule fondue dans le cadre de la projection thermique à la torche à plasma s'écrasant sur des surfaces solides et sèches. Cette modélisation comporte de nombreuses difficultés. La première est relative à la simulation d'une surface libre (particule/gaz) en hydrodynamique rapide. La seconde concerne la conduction de chaleur très forte

associée au problème de l'écrasement. La dernière difficulté concerne le processus de solidification qui fait apparaître une deuxième frontière libre (fluide/solide) avec une restitution de chaleur latente localisée.

• L'objectif de ce travail de recherche est de construire un modèle d'éléments finis en utilisant la méthode Lagrangienne pour simuler le procédé de l'impact d'une particule fondue sur des surfaces (lisses ou rugueuses) de substrats. Pour traiter correctement les grandes déformations dans le processus de l'impact, une technique de remaillage automatique durant le calcul a été proposée.
• L'étude a impliqué le développement des méthodes et des algorithmes de modélisation dans les domaines de la mécanique des fluides, du problème de la surface libre et de la thermique transitoire. Le modèle construit permet d'obtenir les informations concernant le champ de vitesses, le champ de pressions, l'avancement de la surface libre et l'évolution de la température dans la particule et dans le substrat. Il rend aussi possible l'étude de l'influence des propriétés physiques des matériaux, de la vitesse de l'impact et de la rugosité du substrat sur le procédé de l'écrasement.
• Les programmes de calcul informatiques ont été développés en langage C++ en utilisant les techniques de programmation orientée objets. Par ailleurs, afin de visualiser les résultats numériques, un post-processeur a été développé avec le support graphique OpenGL sur PC (Windows NT) et sur station SGI (UNIX) **[35].**

L'étude de l'impact d'une particule liquide trouve son intérêt dans de nombreuses applications : par exemple, dans l'aéronautique, l'industrie d'automobile, le génie chimique, le génie métallurgique etc. L'étude, réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat soutenue par Zhigang Feng à l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard, s'intéresse à la modélisation numérique de l'impact d'une particule fondue dans le cadre de la projection thermique à la torche à plasma s'écrasant sur des surfaces solides et sèches. Cette modélisation comporte de nombreuses difficultés. La première est relative à la simulation d'une surface libre (particule/gaz) en hydrodynamique rapide. La seconde concerne la conduction de chaleur très forte associée au problème de l'écrasement. La dernière difficulté concerne le processus de solidification qui fait apparaître une deuxième frontière libre (fluide/solide) avec une restitution de chaleur latente localisée. Zhigang Feng - Matthieu Domaszewski Modélisation en mécanique des structures **[35].**

I.4.4.Etalement de la particule

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

Sur un substrat lisse, cet étalement peut être décomposé en trois étapes (qui peuvent être dépendantes) : une phase très courte, de quelques nanosecondes, correspondant à l'impact initial avec le plus souvent le phénomène de splashing, une deuxième phase de l'ordre de la microseconde correspondant à l'étalement de la particule avec ou sans éclaboussures (flattening, splashing) et une troisième de quelques microsecondes correspondant au refroidissement de la lamelle comme le montre la Figure (1.10). La solidification de la lamelle commence généralement avant que son étalement soit complètement terminé.

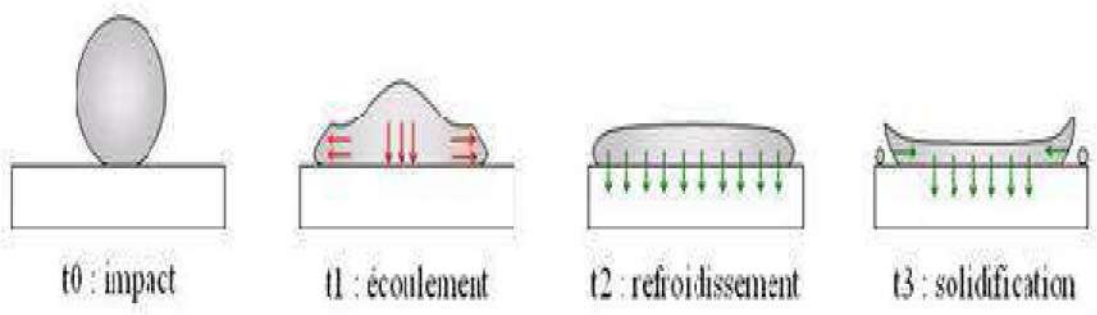


Figure 1.10.Mécanisme d'étalement des lamelles **[36]**

I.5.La solidification des lamelles

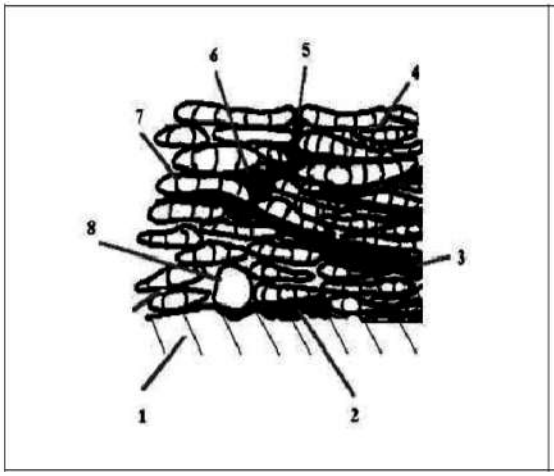
Au programme de ces journées, qui se dérouleront du 12 au 14 mars 2003, se trouvent : les propriétés d'usage et les choix des matériaux (caractéristiques mécaniques, comportement tribologique...) ; les matériaux projetés (poudres et fils) ; les méthodes d'élaboration, de stockage et de mise en œuvre de ces matériaux ; les mécanismes Apprendre les propriétés d'usage des dépôts et le choix des matériaux, étudier les processus de construction des dépôts et l'effet des paramètres opératoires, connaître les mécanismes d'adhérence des dépôts : le laboratoire d'Études et de recherches sur les matériaux, les plasmas et les surfaces (LERMPS) de l'UTBM organise à Sévenans un stage de formation continue dans le cadre du cycle "Science, technologie et applications en projection thermique" de formation et d'adhérence des dépôts ainsi que le rôle et les effets de paramètres opératoires.

La formation s'adresse à tous les publics : ingénieurs, techniciens et opérateurs **[37].**

I.6.Formation du dépôt

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

Thermomécaniques et électriques sont liées à la qualité de contact entre les différentes lamelles empilées et à l'architecture du dépôt.



1. Substrat
2. Défaut d'adhérence à l'interface
3. Macrofissures parallèles à la surface dues aux contraintes thermiques
4. Microfissures interlamellaires
5. Macrofissures perpendiculaires à la surface
6. Porosité ouverte
7. Microfissures interlamellaires dues aux contraintes de trempe
8. Particule infondue

Figure I.11. Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma **[38].**

I.7.À Oxydation des substrats

La projection plasma sous air atmosphérique (APS) de poudres métalliques s'accompagne généralement de phénomènes d'oxydation. Les dépôts obtenus présentent des oxydes au sein de la matrice métallique. Différents auteurs ont montré que l'oxydation pouvait intervenir à différents stades du procédé **[39]**
- lors du vol des particules dans le plasma
- lors de la construction du dépôt : pendant la formation des lamelles sur le substrat et lors du refroidissement du dépôt, entre chaque passe de projection (passage de la torche plasma) **[40].**

I.8.Défauts des revêtements et mesure de porosité

Défauts des revêtements déposés par PVD, Un défaut majeur des procédés à arc réside dans l'éjection, à l'état liquide, de fragments de cible pouvant atteindre 2 µm, imparfaitement incorporés dans le revêtement. De plus, dans le cas des dépôts multicouches et quel que soit le procédé d'élaboration, des dommages causés par une mauvaise préparation du substrat (défaut de polissage) peuvent conduire à un défaut d'empilement des couches **[41].**

I.9.L'état de lart

Ahmed et Rangel **[42]** ont étudié numériquement l'impact et la solidification d'une gouttelette en aluminium sur les substrats rugueuse, en utilisant un modèle axisymétrique bidimensionnel. Leurs résultats prouvent que l'impact de gouttelette sur un substrat rugueuse est presque toujours accompagné par l'éclaboussement. Cependant, le degré d'éclaboussement diminue avec l'augmentation de la rugosité.

Les particules fondues qui impactent sur la surface à revêtir s'étalent en 1 à 2µs et solidifient en 2 à 10 µs, la solidification commençant avant la fin de l'étalement. L'impact d'une particule suivante n'intervient en général qu'au bout de 10 à 100µs **[43].**L'empilement successif des lamelles forme le dépôt. La lamelle constitue donc, la brique fondamentale dans la construction du dépôt.

Fukanuma **[44]** a présenté une formule qui décrit le processus d'aplatissement d'une gouttelette sur une surface approximative, et a conclu que le rapport d'aplatissement diminué dans le temps avec l'augmentation de la rugosité.
Xu et autres **[45]** avaient utilisé la photographie à vitesse élevée pour étudier l'éclaboussement de corona dû à l'impact d'une gouttelette liquide sur un substrat sec et lisse. Ils ont découvert que la pression de gaz environnante décroissante empêche l'éclaboussement. Et la pression de seuil est une fonction de la vitesse d'impact, du poids moléculaire du gaz, et de la viscosité liquide. Ils ont conclus aussi que la compressibilité du gaz est responsable de l'éclaboussement.

La formation d'une lamelle dépend à la fois de paramètres liés à la particule en vol (sa taille, sa vitesse, sa température, son état de fusion à l'impact, et ses propriétés thermo-physiques) et de paramètres liés au substrat (ses propriétés, son état de surface, sa température de préchauffage et la présence éventuelle d'oxydes sur sa surface).

Zhang a proposé un modèle théorique basé sur le volume de fluide (VOF) pour la propagation de gouttelette et la solidification considérant la tension superficielle, la solidification et la résistance thermique de contact. Le rapport splat-flattening a été décrit en fonction des nombres de Reynolds, de Weber, de Prandtl et de Jakob. Zhang et autres **[46]** ont étudié la morphologie de l'impact et la re-solidification de substrat numériquement et expérimentalement et ont constaté que la taille, la vitesse, et la température, de gouttelette d'un part et le matériau de substrat et leur température jouent les rôles significatifs dans la morphologie de l'impact et le taux de solidification.

Zhao et autres **[47]** et Pasandideh-Fard et autres **[48]** ont proposé des modèles détaillés en résolvant l'équation de Navier-Stokes couplée à l'équation d'énergie. Leurs prévisions théoriques de la propagation de gouttelette étaient en bon accord avec les données expérimentales. Cependant, les procédures numériques adoptées dans ces modèles étaient informatique chères. De tels modèles détaillés sont plus utiles pour obtenir une compréhension fondamentale profonde sur les processus physiques impliqués dans le phénomène d'impact.

Pasandideh-Fard et autres **[49]** ont prolongé l'étude au modèle tridimensionnel développé par Bussmann et autres **[50]** où la méthode d'enthalpie a été employée pour résoudre le problème de solidification. Le dépôt des gouttelettes de bidon sur une surface d'acier inoxydable a été étudié en utilisant des expériences et des simulations numériques. Les résultats de simulation étaient bien conformes aux images expérimentales. Mostaghimi et autres **[51]** ont montré que le rapport d'aplatissement est lié au nombre de Reynolds et, au nombre de Weber. Cependant, l'effet de la solidification sur la propagation de gouttelette peut être négligé quand le rapport du nombre de Stefan au nombre de Prandtl est beaucoup plus petit que l'unité.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la projection thermique, la projection par flamme, la projection par arc électrique et la projection par plasma, pour diminuer les défauts de revêtement maximum par l'utilisation de la méthode numérique.

Afin de parvenir à une solution au problème des creux et les pics surfacique et le substrat, mais cette étude ne étions pas assez, nous avons parlé de ce chapitre suivant.

Chapitre II :

Modélisation mathématique

Introduction

Dans ce chapitre on va représenter les équations mathématiques générales pour résoudre le problème et pour afficher toutes les étapes de l'étalement et solidification des particules sur le substrat.

II.1.Modèle dynamique

Bien que les expériences concernant les impacts de gouttes aient pris de l'ampleur depuis les premiers travaux de Worthington. La diversité des écoulements, les temps caractéristiques très courts et les échelles spatiales très petites rendent les manipulations difficiles à réaliser. De plus, le caractère aléatoire de l'impact est difficile à contrôler (vitesse d'impact; température…) **[52].**

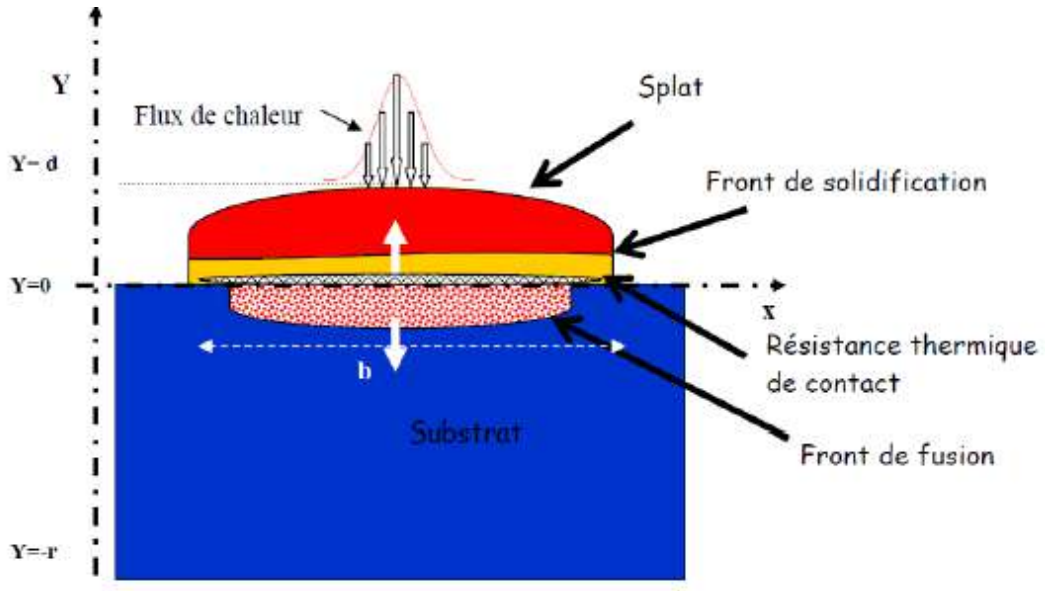


Figure II.1. Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat **[52]**

La mécanique des fluides est modélisée par les trois équations fondamentales :

-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).

I.1.1. Equation de continuité

La forme locale de la conservation de la masse s'applique seulement sur un point M du volume V de fluide, ce qui explique l'utilisation de l'outil différentielle. On parle de forme intégrale faible. On rappelle la forme intégrale forte:

$$\int \frac{d\rho}{dt}\, dv + \int \rho.\vec{v}.\vec{n}.dS=0 \qquad \textbf{(II.1)}$$

Cette écriture est constituée d'une intégrale sur un volume et d'une intégrale sur une surface. Cela peut ne pas être pratique. Or, il existe un théorème permettant de transformer une intégrale double en intégrale triple et vice versa: le théorème de Green-Ostrogradski ou le théorème de flux-divergence:

$$\int \rho.\vec{v}.\vec{n}.dS= \int div(\rho\vec{v}).\, dv \qquad \textbf{(II.2)}$$

La forme intégrale forte peut donc s'écrire simplement sous une intégrale triple:

$$\int (\frac{d\rho}{dt} + div(\rho\overrightarrow{v}))\, dv = 0 \qquad \textbf{(II.3)}$$

On retrouve dans cette dernière expression le principe fondamental de la mécanique: la conservation de la vitesse pour tout volume V' sur V.

On rappelle que si $Ax + By + Cx^2 = 0$ est vrai pour tout (x,y), alors

$$A = B = C = 0 \qquad \textbf{(II.4)}.$$

En appliquant cette règle à la forme intégrale forte, on obtient la forme intégrale faible ou forme locale:

$$\frac{d\rho}{dt} + div((\rho\overrightarrow{v})=0 \textbf{ [2]} \qquad \textbf{(II.5)}$$

I.1.2. Equation de quantité de mouvement

La loi fondamentale de la dynamique: la variation de la quantité de mouvement dans l'élément dxdydz est égale à la somme des efforts appliqués.

$$\frac{\Delta\rho\vec{U}}{\Delta t} = \sum \vec{F} \qquad \textbf{(II.6)}$$

Les efforts extérieurs appliqués sur l'élément sont:
-Des forces volumiques: la gravité $\overrightarrow{g}\rho$ dxdydz les forces éléctro-magnétiques.
-Des forces surfaciques: interaction des autres particules fluides sur l'élément pour fluide.
-Des forces normales de pression: $-p\vec{n}$ dS (qui existent même pour un fluide
-Des forces de viscosité (tenseur) $\overrightarrow{\sigma\otimes}\ \vec{n}$dS (qui dépendent du tenseur des déformations ($\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$) Pour les écoulements de gaz étudiés (écoulement à grande vitesse), la force de gravité est très faible et on négligera les effets de viscosité (couches limites, sillage, ..).

Avec ces approximations, la somme des forces de pression s'écrit pour l'élément de l'équation II.7:

$$\sum \vec{F}=\left(p(x-\frac{dx}{2},y,t)-p(x+\frac{dx}{2},y,t)\right)dydz\overrightarrow{e_x} + \left(p(x,y-\frac{dy}{2},t)-p(x,y+\frac{dy}{2},t)dxdz\overrightarrow{e_y}\right) \qquad \textbf{(II.7)}$$

En effectuant un développement limité à l'ordre 1, on obtient:

$$\sum \vec{F} = -\frac{\partial p}{\partial x} dxdydz\, \overrightarrow{e_x} - \frac{\partial p}{\partial y}\, dxdydz \overrightarrow{e_x} \quad \textbf{(II.8)}$$

oit sous forme vectorielle (forme conservative)

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + div(\rho \vec{U} \otimes \overrightarrow{U}) = -\overrightarrow{grad\, p} \quad \textbf{(II.9)}$$

qui correspond aux 3 équations scalaires en coordonnées cartésiennes:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + div(\rho u \overrightarrow{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad \textbf{(II.10)}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + div(\rho v \overrightarrow{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad \textbf{(II.11)}$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + div(\rho w \overrightarrow{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad \textbf{(II.12)}$$

On peut écrire une forme conservative complète en notant $\overline{\overline{Id}}$ le tenseur

identité : $\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ **(II.13)**

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + div(\rho \overrightarrow{U} \otimes \vec{U} + p\, \overline{\overline{Id}}) = 0 \quad \textbf{(II.14)}$$

La forme non conservative (ou convective) s'obtient en développant le terme en divergence et en utilisant l'équation de bilan de masse:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + div(\rho u \overrightarrow{U}) = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} + u\, div(\rho \vec{U}) + \rho \vec{U}.\overrightarrow{grad} u$$

$$= \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \overrightarrow{U}.\overrightarrow{grad} u\right) + \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{U}.\overrightarrow{grad} u\right) + u\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{U})\right)$$

$$= \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \overrightarrow{U}.\overrightarrow{grad} u\right) = \rho \frac{Du}{Dt} \quad \textbf{(II.15)}$$

L'équation sous forme non conservative correspond donc à l'écriture classique de la loi fondamentale de la dynamique : $m\vec{\gamma} = \vec{F}$: **[53]**

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = \rho\left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U}.\overrightarrow{grad}\, \vec{U}\right) = -\overrightarrow{grad} \quad \textbf{(II.16)}$$

De cette équation, on peut en déduire une équation de bilan sur l'énergie cinétique en effectuant le produit scalaire avec le vecteur vitesse $\vec{U}$

$$\rho\frac{D\vec{U}}{Dt}.\vec{U} = \rho\frac{D\left(\frac{U^2}{2}\right)}{Dt} = -\vec{U}.\overrightarrow{grad}\,p \quad \textbf{(II.17)}$$

Variation énergie cinétique — travail des forces de pression

I.1.3. Equation de conservation d'énergie

La conservation de l'énergie est un principe physique selon lequel dans un référentiel inertiel, l'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps[1].

Mathématiquement, la variation instantanée d'énergie est nulle. $\frac{dE}{dt} = 0$

En mécanique newtonienne, c'est aussi vrai pour un système influencé par une force conservative.

Par contre dans un référentiel non inertiel un corps initialement au repos peut acquérir spontanément de la vitesse[1], ce qui correspond à une acquisition d'énergie cinétique : la loi de conservation de l'énergie d'un système isolé n'est pas valable dans ce cadre.

Dans les systèmes simples de la mécanique newtonienne, la somme des énergies cinétiques, K, et des énergies potentielles, U, est une constante. Elle demeure inchangée sous l'action de forces conservatives uniquement[2].

$$k_i + U_i = k_f + U_f \quad \textbf{(II.18)}$$

Ou : $\Delta k + \Delta U = 0$

Cette somme, qui représente l'ensemble de l'énergie présente dans le système, porte le nom d'énergie mécanique, E[2].

$$E = K + U \quad \textbf{(II.19)}$$

Il est alors possible d'exprimer le principe de conservation de l'énergie en utilisant l'énergie mécanique[2].

$$\Delta E = 0 \quad \textbf{(II.20)}$$

Ou : $E_i = E_f$

On parle d'énergie initiale et finale en se référant à l'énergie présente dans un système avant et après l'effet d'une force. Le type de force agissant sur le système détermine s'il y a ou non conservation de l'énergie[2].

Les lois de conservation de l'énergie de la mécanique et de la thermodynamique peuvent être généralisées à l'équation de conservation :

$$\Delta U + \Delta E_{c} + \Delta E_{p.} = W + Q \quad \textbf{(II.21)}$$

où ΔU est l'énergie interne du système, ΔE_c l'énergie cinétique, ΔE_p l'énergie potentielle, W le travail échangé avec le milieu extérieur, et Q la quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur**. [54]**

I.2.Modèle thermique utilisé

Le modèle de transferts thermiques qu'on a 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 **[55].**

$$\rho c_p^{ea} \partial(T)\partial t + V.\nabla T = \nabla . \lambda \nabla T + Q \qquad \textbf{(II.22)}$$

I.3.Transfert de chaleur avec changement de phase

Le changement d'état liquide-solide d'un matériau pur est caractérisé par la transformation, à température constante, d'une phase liquide en une phase solide ou inversement. Cette réaction réversible s'accompagne d'une consommation (fusion) ou d'une restitution (solidification) d'énergie : l'enthalpie massique de fusion (ou la chaleur latente de fusion). Le but de ce transfert est de faire le point sur les connaissances acquises sur le transfert de chaleur avec changement d'état dans un matériau à changement de phase (MCP) où les deux phases liquide et solide sont en présence **[56].**

Conclusion

Dans ce chapitre on a exposé le modèle dynamique et thermique régissant la physique de l'étalement et la solidification d'une particule impactant sur substrat et qui se résume dans l'équation de continuité et l Equation de quantité de mouvement, Equation de conservation d'énergie ainsi que l'équation couleur et de suivie de frontière. La résolution de système nécessite des méthodes numériques, qui seront l'objet de chapitre suivant.

Chapitre III :

Modélisation numérique

Introduction

Les méthodes numériques (éléments finis, différences finies, volumes finies, permettent de trouver une solution avec la discrétisation du domaine et la résolution d'équation. Les équations de ce chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées.

III.1.Les principales méthodes

On propose les principales méthodes développées pour résoudre ces problèmes : Méthode a grille mobile, Méthode à grille fixe, et Méthode de la chaleur spécifique équivalente, Méthode enthalpique.

III.1.1. Méthodes à maillage mobile

Elles utilisent un maillage qui s'adapte aux contours de l'interface. Il est nécessaire d'avoir des éléments de maillage aux frontières régulières, l'utilisation de frontières irrégulières engendre des erreurs numériques. Un remaillage est nécessaire pour suivre les mouvements de l'interface au cours du temps. Or la complexité des algorithmes de remaillage est telle qu'il est difficile de simuler des écoulements dans lesquels se produisent de forts changements de topologie de l'interface. Ce type de méthode est utilisé pour étudier des écoulements à surface libre comme les phénomènes de l'impact et de solidification. **[57]**

III.1.2. Méthodes à maillage fixe

Elles emploient un maillage fixe en utilisant une adaptation locale du maillage dans chaque cellule contenant une portion d'interface **[58]**. C'est donc l'interface qui est en mouvement dans une grille immobile qui peut être structurée, ou non structurée.

On distingue parmi les différentes méthodes, celles des marqueurs de surface et celles de suivi de volume. La première approche a été introduite par Harlow et Welch **[59].**

Elle est dite MAC « Marker and Cells », elle utilise des points virtuels pour marquer toute une région qui ne contient qu'un seul fluide. Les points marqueurs sont transportés de façon passive par l'écoulement, en général à l'aide d'une méthode lagrangienne. Cette méthode MAC est historiquement la première à avoir permis l'étude des écoulements à surface libre complexe tels que l'impact d'une goutte sur un film liquide **[60].** La difficulté de ces méthodes tient à ce qu'il faut constamment redistribuer les points marqueurs dans les régions où l'écoulement a provoqué leur dispersion afin de conserver une bonne précision dans le calcul. Il est ainsi nécessaire de stocker les coordonnées de chacun des points marqueurs, ce qui en limite le nombre.

Il est difficile avec ces méthodes de reconnecter les interfaces de façon automatique. Les algorithmes de redistribution des points marqueurs qui assurent la rupture ou la coalescence des interfaces peuvent être complexes. La deuxième approche de suivi de volume utilise une description implicite de l'interface. Celle-ci est représentée explicitement comme une surface qui traverse le maillage, et elle est caractérisée à l'aide d'une fonction de phase. Par calcul de l'évolution de cette fonction, l'interface est déterminée en fonction du temps. Pour ce faire deux méthodes existent :

➢ Méthode enthalpique

Cette méthode isole le transfert thermique relié au changement de phase par le biais d'un terme source dans l'équation d'énergie ou d'une chaleur spécifique équivalente. Il n'est donc pas nécessaire de calculer explicitement la position du front de fusion. Les mêmes équations sont résolues dans tout le domaine de calcul, y compris la région solide, sans se préoccuper des conditions à satisfaire à l'interface.

L'équation d'énergie (III.1) est écrite suivant la formulation proposée par Voller, Pour laquelle l'énergie totale est séparée en deux composantes; la chaleur sensible et la chaleur latente:

$$H(T) = h(T) + Lf1 \qquad \textbf{(III.1)}$$

La relation entre la fraction liquide et l'enthalpie est alors décrite par la fonction de 'Heaviside': **[61]**

$$F_1 = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \text{ si } \begin{cases} h > 0 \\ h < 0 \end{cases} \qquad \textbf{(III.2)}$$

➢ 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 Cp. Ainsi, si le chemin de Solidification n'est fonction que de la température **[62]**

III.2. Présentation de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u, définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution. Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolés.

Bien qu'il existe de nombreux logiciels exploitant cette méthode et permettant de « résoudre » des problèmes dans divers domaines, il est important que l'utilisateur ait une bonne idée de ce qu'il fait, notamment quant au choix du maillage et du type d'éléments qui doivent être adaptés au problème posé : aucun logiciel ne fait tout pour l'utilisateur, et il faut toujours garder un oeil critique vis-à-vis de solutions approchées. Pour cela il existe des indicateurs d'erreur et des estimateurs d'erreur qui permettent d'ajuster les différents paramètres.

La méthode des éléments finis a pour but de remplacer un problème mathématique défini dans un milieu continu et sous la forme d'équations différentielles ou d'intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement.

En résumé, cette méthode nécessite la discrétisation d'un continuum en un modèle composé d'un assemblage d'éléments finis qui possèdent des formes et des tailles

variées. De plus, le calcul de la solution nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, tels que :
La géométrie discrétisée en éléments finis,
Les contraintes imposées sur le dispositif,
Les excitations présentes dans le dispositif,
Les propriétés des matériaux composant le dispositif.
Schématiquement Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis peuvent illustrer à la figure suivante **:**

Domaine continu Discrétisation géométrique Construction de l'approximation nodale Calcul des matrices élémentaires Assemblage Prise en Compte des Conditions aux limites Et Résolution de l'équation matricielle Évaluation des Grandeurs

Figure III.1. Démarche éléments finis **[63]**

III.3. Forme générale des équations du système

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_{\square}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x c_{\square}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_y c_{\square}) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial x}{\partial y}\right) + S_{\emptyset} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Ø: Variable généralisée
$C_{Ø}$: Coefficient d'advection transitoire.
$\Gamma_{Ø}$: Coefficient de diffusion.
$S_{Ø}$: Termes source.

Variable Ø	Coefficient d'advection $C_{\square}$	Diffusivité $\Gamma_{Ø}$	Termes source $S_{\square}$
V_X	1	M	$\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial \mu}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial \mu}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}$
V_Y	1	M	$\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial \mu}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial \mu}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}$
T	1	$\frac{K}{\rho C^e}$	$\frac{\varphi}{\rho C^e}$
ρ	1	0	0

Tableau III.1. Tableau de Représentation d'équation de transport **[64].**

III.4. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.4.1. Formulation variation elle forte

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s'écrit alors comme suit:

Trouver $U(x)U(x)$ □ espace des solutions *US* tel que : **[65 ; 66]**

$$\mathcal{L}(u) - F = 0 \square x \square \Omega B(u) = u_0 \square x \square \Gamma u0 \quad \textbf{(III.4)}$$

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

.

III.4.2. Formulation variation elle faible

La formulation variation elle faible peut être obtenue par les étapes suivantes :

1) approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par u tel que : **[67 ; 68]**

$$\tilde{u} = \sum_{i=1}^{n} N_i \tilde{u}_i \quad \textbf{(III.5)}$$

Ou $N_i = N_i(x, y)$ désignent les fonctions de forme u et des valeurs nodales indéterminées.

2) introduire (III.6) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que

$$\varepsilon = \mathcal{L}(u) - F \neq 0 \quad \textbf{(III.6)}$$

Ou $\varepsilon = 0$, $u = u$ c.à.d. lorsqu'une solution exacte existe.

3) obtenir une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire W tel que :

$$\int w(\mathcal{L}(\tilde{u}) - F)\, d\Omega = 0,\ k = 1, 2\ldots\ldots N \quad \textbf{(III.7)}$$

Ou N Nombre d'inconnues indépendants du système (III.7).

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

On pose :

$$w_k = N_k \Longrightarrow \int N_k\, \mathcal{L}(\sum_{i=1}^{n} N_i \tilde{u}_i)\, d\Omega = 0 \quad \textbf{(III.8)}$$

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

$$\square\ v\ \square\ (\Omega) H_0^1\ \ a(\tilde{u}, v) \quad \textbf{(III.9)}$$

A (u, v) est la forme bilinéaire associée à $(\mathcal{L})$ Soit Ω un ouvert borné de Rd et $\partial\Omega$ est régulier**.**

On considère alors le problème :

$$Lu = f \text{ sur } \Omega \text{et } u = 0 \text{ sur } \partial\,\Omega = 0 \quad \textbf{(III.10)}$$

III.5. Discrétisation

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

Le procédé de discrétisation par élément fini consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire.

$$([A_e^{transient}] + [A_e^{advection}] + [A_e^{diffusion}])\{\emptyset_e\} = \{S_e^{\emptyset}\} \quad \textbf{(III.11)}$$

Pour les intégrales élémentaire, La méthode Galerkin des résiduels pesés est employé. **[69]**

III.5.1. Terme temporelle

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

$$([A_e^{transient}] = \int W^e \frac{(\partial \rho c_\emptyset \square)^e}{\partial t} \text{ d (vol)} \quad \textbf{(III.12)}$$

Avec :

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

$$\int W_i^e \frac{(\partial \rho c_\emptyset \square)^e}{\partial t} d(vol) = \int W_i^e \rho c_\square \; W_j^e \text{d (vol)} \frac{\partial \square_j^e}{\partial t} + \int W_i^e \frac{\partial \rho c_\square \square_j^e}{\partial t} W_j^e d(vol) \square_j^e \quad \textbf{(III.13)}$$

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

$$M_{ij} = \int W_i^e \rho c_\square \; W_j^e \text{d (vol)} \quad \textbf{(III.14)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée. $M_{ij} = \delta_{ij} \int W_i^e \rho c_\square \, d(vol)$ **(III.15)**

Ou:

δδij Delta de Kronecker (0 si i ≠ j, 1 si i = j) **(III.16)**

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

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

$$(\rho\emptyset)_n = (\rho\emptyset)_{n_1} + \Delta t \; (\delta(\frac{\partial(\rho \square)}{\partial t})_n + (1-\boldsymbol{\delta}) \; (\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{n-1}) \quad \textbf{(III.17)}$$

Ou :

δ : coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark

L'équation (III-**18**) est écrite comme suite:

$$(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_n \frac{1}{\Delta t \delta} \; (\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\Delta t \delta} \; (\rho\emptyset)_{n_1} + \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{n_1} \quad \textbf{(III.18)}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\emptyset)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\emptyset)_n}{2\Delta t} \quad \textbf{(III.19)}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_n}{\Delta t} - \frac{(\rho\emptyset)_{n-1}}{\Delta t} \quad \textbf{(III.20)}$$

L'arrangement de premier ordre ci-dessus de différence de temps est choisi pour être conformé à l'algorithme courant d'advection de VOF. La nième étape de fois produit une contribution à la diagonale de la matrice élémentaire, alors que les dérivés de l'étape précédente de temps forment des contributions au terme source. [**70]**

III.5.2. Advection Terme

Actuellement Flotran a trois approches pour discrétiser le terme d'advection. le monotone rationaliser vent (MSU) approche est du premier ordre précis et tend à produire en douceur et des solutions monotones. Le streamline vent / Petrov-Galerkin (SUPG) approche et
L'Galérien (COLG) approche colocalisé second ordre sont exactes et ont tendance à produire solutions oscillatoires.

III.5.2.1. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

Le terme d'advection est géré par une approche monotone aérodynamique basé sur l'idée que le transport d'advection pur est le long des lignes caractéristiques. Il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transporté dans un connue champ de vitesse. Voir Streamline Upwind approche.

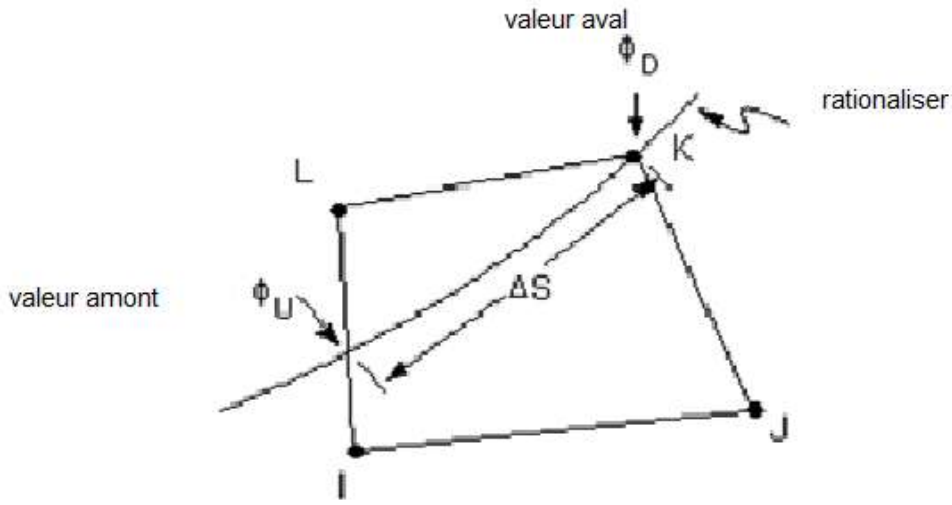


Figure III.2. Rationaliser approche Upwind

Le champ de vitesse lui-même peut être envisagé comme un ensemble de lignes de courant partout tangente à les vecteurs de vitesse. Les termes d'advection peuvent donc être exprimés en termes de rationaliser les vitesses. Dans le transport d'advection pure, on suppose qu'aucun transfert se produit à travers caractéristique lignes, ce est à dire tous les transferts se produit le long des lignes de courant. Par conséquent, on peut supposer que le terme d'advection,

$$\frac{\partial(\rho C_{\square} v_{x\square})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_{\square} v_{y\square})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_{\square} v_{z\square})}{\partial z} = \frac{\partial(\rho C_{\square} v_{s\square})}{\partial s} \qquad \textbf{(III.21)}$$

Lorsqu'elle est exprimée le long d'une ligne de courant, est constante tout au long de un élément:

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_{\phi} v_{s\square})}{ds} \int W^e d(vol) \qquad \textbf{(III.22)}$$

Cette formulation est faite pour chaque élément, dont chacun aura un seul nœud

qui reçoit les contributions de l'intérieur de l'élément. Le dérivé est calculé en utilisant une différence simple:

$$\frac{d(\rho C_{\square} v_S)}{ds} = \frac{(\rho C_{\square} v_{S\square})_U - (\rho C_{\square} v_{S\square})_D}{Ds} \quad \textbf{(III.23)}$$

Où:

D : indice de la valeur au niveau du nœud aval

U : indice pour la valeur prise à l'endroit où la ligne de courant à travers le

nœud en aval entre l'élément

Δ_s : la distance du point situé en amont vers le nœud en aval

La valeur à l'emplacement en amont est inconnue mais peut être exprimée en termes des inconnues valeurs nodales ce est entre les deux. Voir Stream line Upwind Approche nouveau.

Le procédé consiste à vélo à travers tous les éléments et l'identification du vent nœuds. Un calcul est effectué sur la base des vitesses pour voir où l'rationaliser travers le nœud vent venu. Les facteurs de pondération sont calculés en fonction de la proximité en amont de l'emplacement des nœuds voisins. Des détails supplémentaires sont fournis par Rice et Schnipke **[71].**

III.5.2.2.La method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)

L'approche SUPG se compose d'une discrétisation Galerkin du terme d'advection et d'un terme de perturbation supplémentaire diffusion comme qui agit seulement dans la direction d'advection.

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left\{\frac{\partial(\rho v_x C_{\emptyset}\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y C_{\square}\square)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z C_{\square}\square)}{\partial z}\right\} d(vol) + C_{2r}\int \frac{zh}{2U_{mag}} \left\{v_x\frac{\partial W^e}{\partial x} + v_y\frac{\partial W^e}{\partial y} + v_z\frac{\partial W^e}{\partial z}\right\} \left\{\frac{v_x\partial(\rho C_{\emptyset}\emptyset)}{\partial x} + \frac{v_y\partial(\rho C_{\emptyset}\emptyset)}{\partial y} + \frac{v_z\partial(\rho C_{\emptyset}\emptyset)}{\partial z}\right\} d(vol)$$

(III.24)

Où:
C_{2r} : Coefficient global fixé à 1,0
H : longueur de l'élément selon la direction d'advection

$$U_{mag} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad \textbf{(III.25)}$$

$$Z = \begin{cases} 1 & si\ 0 \le p_e \le 3 \\ \frac{p_e}{3} & si\ p_e \ge 3 \end{cases} \quad \textbf{(III.26)}$$

$$p_e = \frac{\rho C_{\square} U_{mag} h}{2r_{\square}} = peclet\ number \quad \textbf{(III.27)}$$

Il ressort clairement de l'approche SUPG que le maillage est raffiné, les termes de perturbation va à zéro et la formulation Galerkin approche seconde précision des commandes. Le terme de perturbation fournit la stabilité nécessaire qui manque dans le pur Galerkin discrétisation. Des détails supplémentaires sont fournis par Brooks et Hughes**. [72]**

III.5.2.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

L'approche COLG utilise le même schéma de discrétisation avec l'approche SUPG avec un concept colocalisés. Dans ce schéma, une seconde série de vitesses, à savoir, sur la base de l'élément.

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left\{\frac{\partial(\rho v_x^e C_{\square})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y^e C_{\square})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z^e C_{\square})}{\partial z}\right\} d(vol)$$

$$+ C_{2r}\int \frac{zh}{2U_{mag}^e}\left\{\frac{v_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{v_y^e \partial W^e}{\partial y} + \frac{v_z^e \partial W^e}{\partial z}\right\}$$

$$\left\{\frac{v_x^e \partial(\rho C_{\emptyset\emptyset})}{\partial x} + \frac{v_y^e \partial(\rho C_{\emptyset\emptyset})}{\partial y} + \frac{v_z^e \partial(\rho C_{\emptyset\emptyset})}{\partial z}\right\} d(vol) \qquad \textbf{(III.28)}$$

Les vitesses nodales sont introduites. Les vitesses nodales par éléments sont faites pour Satisfont à l'équation de continuité, alors que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire l'équation de quantité de mouvement.

Lorsque tous les paramètres sont définis identiques à ceux de l'approche SUPG. Dans cette approche, l'équation de la pression est dérivée de l'élément nodal-fondé vitesses, et il est généralement asymétrique, même pour des problèmes d'écoulement incompressible. L'approche Galerkin colocalisé est formulé de telle manière que, pour l'état d'équilibre écoulements incompressibles, la conservation exacte est préservée même sur mailles grossières sur la convergence de l'ensemble du système.

III.5.3. Terme de Diffusion

L'expression pour les termes de diffusion provient d'une intégration sur le problème Domaine après la multiplication par la fonction de pondération.

$$\text{Diffusion contribution} = \int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \square}{\partial x}\right] d(vol) + \int W^e \frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \square}{\partial x}\right] d(vol)$$

$$\int W^e \frac{\partial}{\partial z}\left[\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right] d(vol) \qquad \textbf{(III.29)}$$

Les termes x, y et z sont tous traités de la même façon. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction x. Une intégration par parties est appliquée:

$$\int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \square}{\partial x}\right] d(vol) = \int \frac{\partial W^e}{\partial x}\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \square}{\partial x} d(vol) \qquad \textbf{(III.30)}$$

Une fois que le dérivé de est remplacé par les valeurs nodales et les dérivés de la fonction de pondération, les valeurs nodales sera supprimée à partir des intégrales

$$\frac{\partial \square}{\partial x} = W_x^e \square \qquad \textbf{(III.31)}$$

$$W_x^e = \frac{\partial w^e}{\partial x} \quad \textbf{(III.32)}$$

La matrice de diffusion ne peut être exprimée comme suit:

$$\left[A_e^{diffusion}\right] = \int W_x^e \Gamma_\emptyset W_x^e + W_y^e \Gamma_\emptyset W_y^e + W_z^e \Gamma_\emptyset W_z^e d(vol) \quad \textbf{(III.33)}$$

III.5.4. Terme source

L'évaluation des termes sources se compose de seulement multipliant les termes sources que représenté dans Streamline Upwind approche par la fonction de pondération et d'intégrer plus le volume.

$S_\emptyset^e = \int W^e S_\square d(vol)$ **[73].** **(III.34)**

III.6.Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini

III.6.1. Bilan thermique : Equation de la chaleur

Soit *v* une partie quelconque de *V* limitée par la surface *s*.

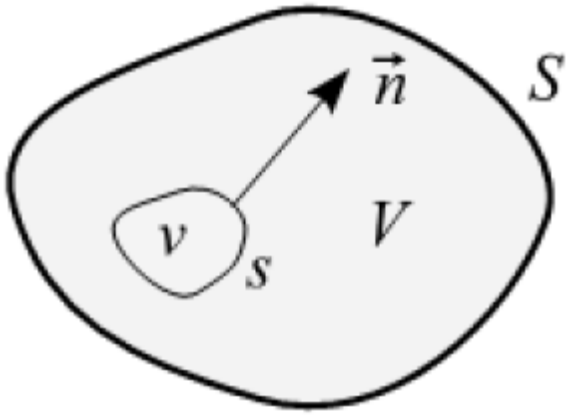


Figure III.3. Bilan thermique.

La puissance thermique stockée dans *v* est égale à la somme de la puissance thermique générée par les sources volumiques contenues dans *v* et de la puissance thermique reçue sous forme de flux à travers la surface *s* :

$$\int_v \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv + \int_v q dv + \int_s -\vec{n}.\left(-k.\overrightarrow{grad T}\right) ds \quad \textbf{(III.35)}$$

ρ: la masse volumique du matériau (kg/m3)
Cp: la capacité thermique massique (J/ kg K)
$\vec{\mathbf{n}}$: la normale unitaire à *s* dirigée vers l'extérieur de *v*

En transformant la relation (III.36) en intégrale de volume à l'aide du théorème d'Ostrogradski, il en résulte :

$$\int_v \left(\rho C_p \dot{T} - \text{div}\left(-k.\overrightarrow{\text{grad}}\, T\right) - q\right) dv = 0 \quad \textbf{(III.36)}$$

Où $\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t}$

De l'équation (III.37), on déduit l'équation de chaleur suivante:

$$\rho Cp\dot{T} - div\left(-k.\overrightarrow{grad}\,T\right) - q = 0 \qquad \textbf{(III.37)}$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (III.38) dans le repère orthonormé $\{x, y, z\}$ S'écrit :

$$\rho \mathbf{C}_p \dot{T} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + q \qquad \textbf{(III.38)}$$

III.6.2. Forme discrétisée : éléments finis

La solution analytique de l'équation (III- 39) est en général inaccessible. On est donc conduit à chercher une solution approchée par une méthode numérique : la méthode des éléments finis. Cette méthode est un cas particulier de la méthode de Galerkin : le champ de températures et les fonctions test appartiennent au même espace de dimension finie.

Le domaine V est décomposé en sous-domaines Ve de forme géométrique simple (les éléments) relies entre eux en des points appelés nœuds. Cette opération s'appelle maillage**. [74]**

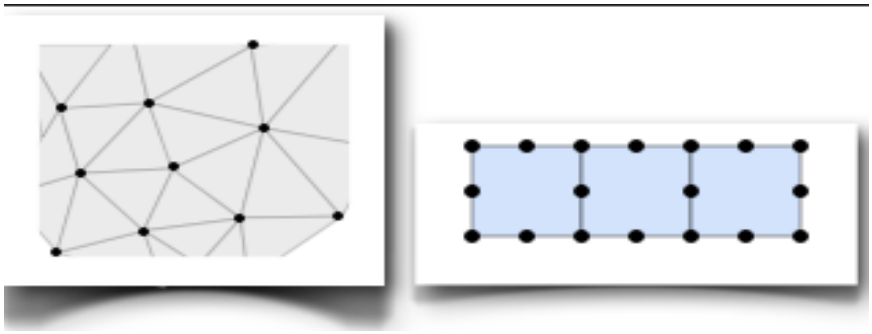


Figure III.4.domaine plan discrétisé en élément relies eux par nœuds.

III.6.3. Représentation élémentaire (ou locale) du champ de températures

Le champ de températures $T^e(x, y, z, t)$ dans l'élément (e) a pour expression:

$$T^e(x,y,z,t) = [\,N_1^e(x,y,z) \ldots N_t^e(x,y,z) \ldots N_n^{e\,e}(x,y,z)] \begin{Bmatrix} T_1^e(t) \\ \vdots \\ T_t^e(t) \\ \vdots \\ T_n^{e\,e}(t) \end{Bmatrix}$$

$$= [N^e(x,y,z)]\{T^e(t)\} \qquad \textbf{(III.39)}$$

$\mathbf{n^e}$: Le nombre de noeuds de l'élément

$\mathbf{N_t^e}$: Les fonctions d'interpolation élémentaires

$\mathbf{N^e(x,y,z)}$: La matrice d'interpolation élémentaire

$\mathbf{\{T^e(t)\}}$: Le vecteur de température des nœuds de l'élément (e).

Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié les grandes méthodes de la discrétisation, nous avons présenté la discrétisation de l'équation généralisé par la méthode des éléments finis.

Pour éviter les étapes de programmation numérique on utilise le logiciel de calcule ANSYS qui est représenté dans le chapitre suivant.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats obtenus par l'étude numérique de la présence des creux et des pics surfacique et l'interaction thermique et dynamique, et aussi on va étudier l'influence de diamètre des creux et des pics sur la formation et solidification des lamelles.

IV.1.Logiciel d'analyse d'ANSYS

Ansys est un logiciel de calcule numérique par la méthode des éléments finis. Contient les étapes suivantes décrites sur la figure **IV.1**

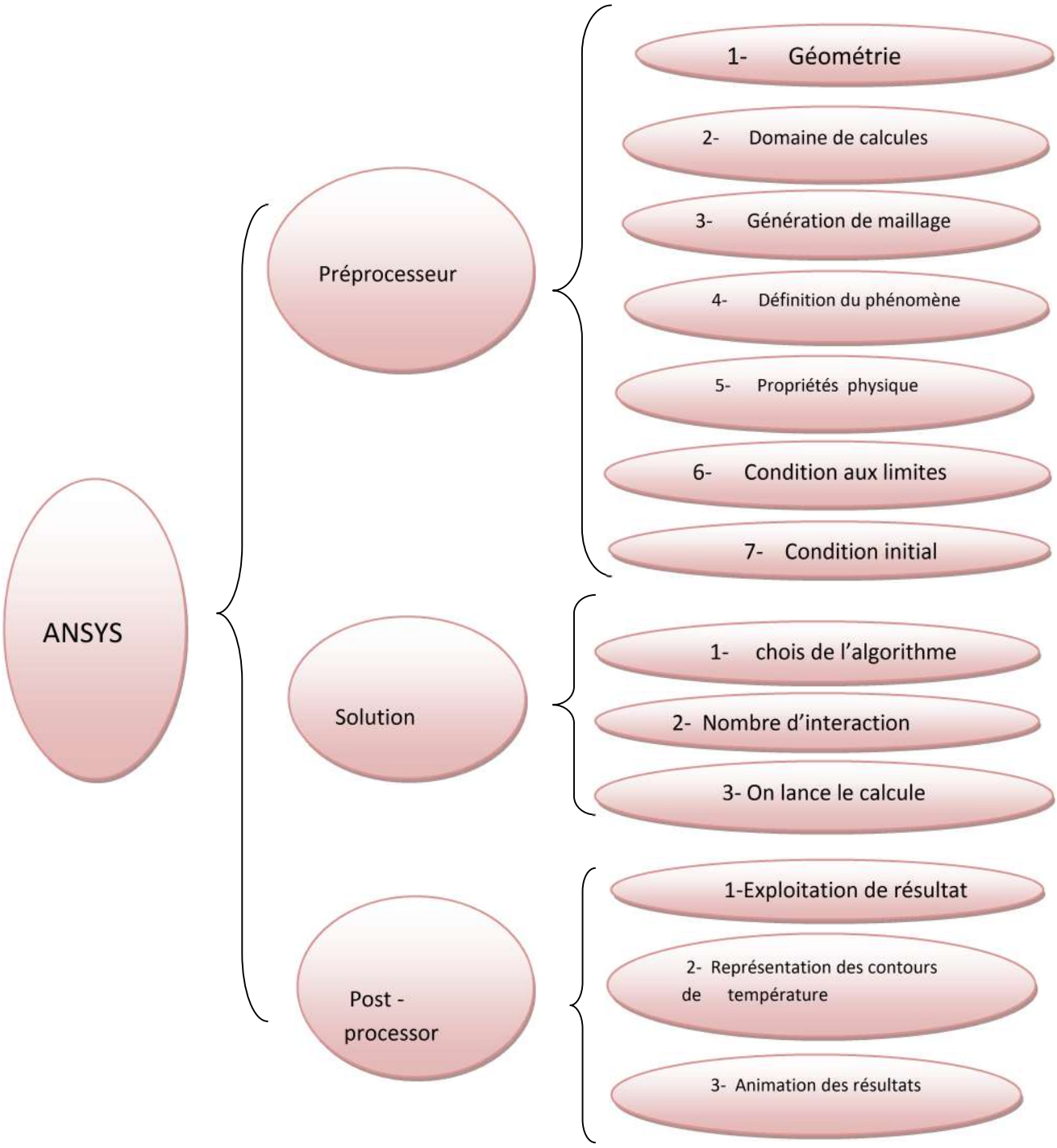

ANSYS
Préprocesseur
1- Géométrie
2- Domaine de calcules
3- Génération de maillage
4- Définition du phénomène
5- Propriétés physique
6- Condition aux limites
7- Condition initial
Solution
1- chois de l'algorithme
2- Nombre d'interaction
3- On lance le calcule
Post - processor
1-Exploitation de résultat
2- Représentation des contours de température
3- Animation des résultats

Figure IV.1. Schéma représente le code de calcul CFD- ANSYS

IV.2.Matériaux utilisés

Dans cette étude numérique on s'intéresse à des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat métalliques (acier) le choix de l'alumine a été orienté par des nombreuses études déjà menées, telle que les travaux expérimentaux de, java Mostaghimi, Yoav Heichal, Sanjeev Chandra, Minxia Xyue qui ont été consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'alumine sur un substrat en acier, et qui sera l'objet d'identification**.**

IV.3.L'aluminium

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

* une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de 1,09.106 j/kg.
* une bonne résistivité électrique >1012 Ohm. M
* une dureté HV sous une charge de 1N de 9,21 GPa
* une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'alumine par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10 – 5mm3/Nm, à l'abrasion par une bille de Sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5 N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à 3.10-3 mm3 /Nm lorsque la température augmente à 400OC.
* 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'alumine 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.
* les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'alumine sert à protéger l'acier contre la corrosion a haute températures.
* les applications médicales ; le caractère biocompatible de l'alumine permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie.
* les applications électriques et électroniques : l'alumine est utilisée dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation.
*les applications optiques : les films d'alumine permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires **[75,76].**

Le tableau ci dessous récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation :

Propriétés	Aluminium	Acier
Densité (kg/m3)	2570	7800
Température de fusion en oc	570	-
Chaleur de fusion [j/kg]	389	-
Viscosité cinématique en [m^2/s]	°C 0 4.5^{E}-7 700 4^{E}-7	-
Conductivité thermique liquide en [W/m K]	70	-
Chaleur spécifique liquide en [j/kg k]	1000	-
Tension superficielle en [N/m]	1.07	-
Conductivité thermique solide en [W/m K]	T(c°) λ 100 144.5 200 147.5 300 152.5 400 148	-
Chaleur spécifique en [j/kg k]	T(c°) C_P 300 980 400 1050 479 1150	-

Tableau IV.1. Propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13 **[77].**

IV.4. Identification

Pour l'identification, où l'objectif est de justifier le model utilisé, on propose pour cette première partie de travail de comparer les résultats obtenus de simulation d'impact de goutte sur un substrat dans les mêmes condition, aux travaux numérique et expérimental de Minxia Xeu ,Yoav Heichal, Sanjeev Chandra, Javad Mostaghimi **[78].**

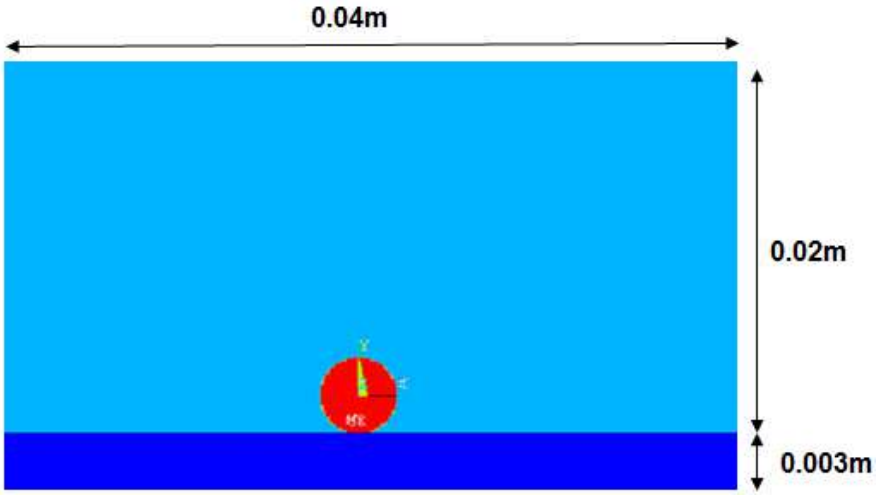
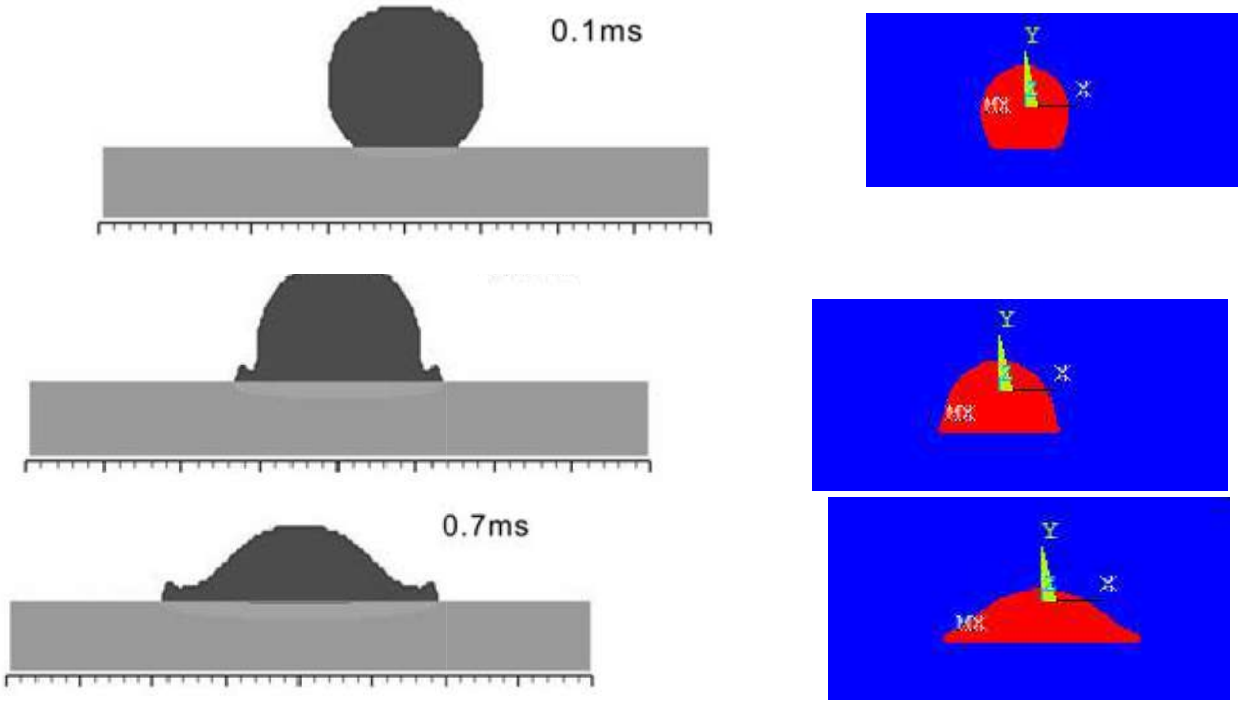
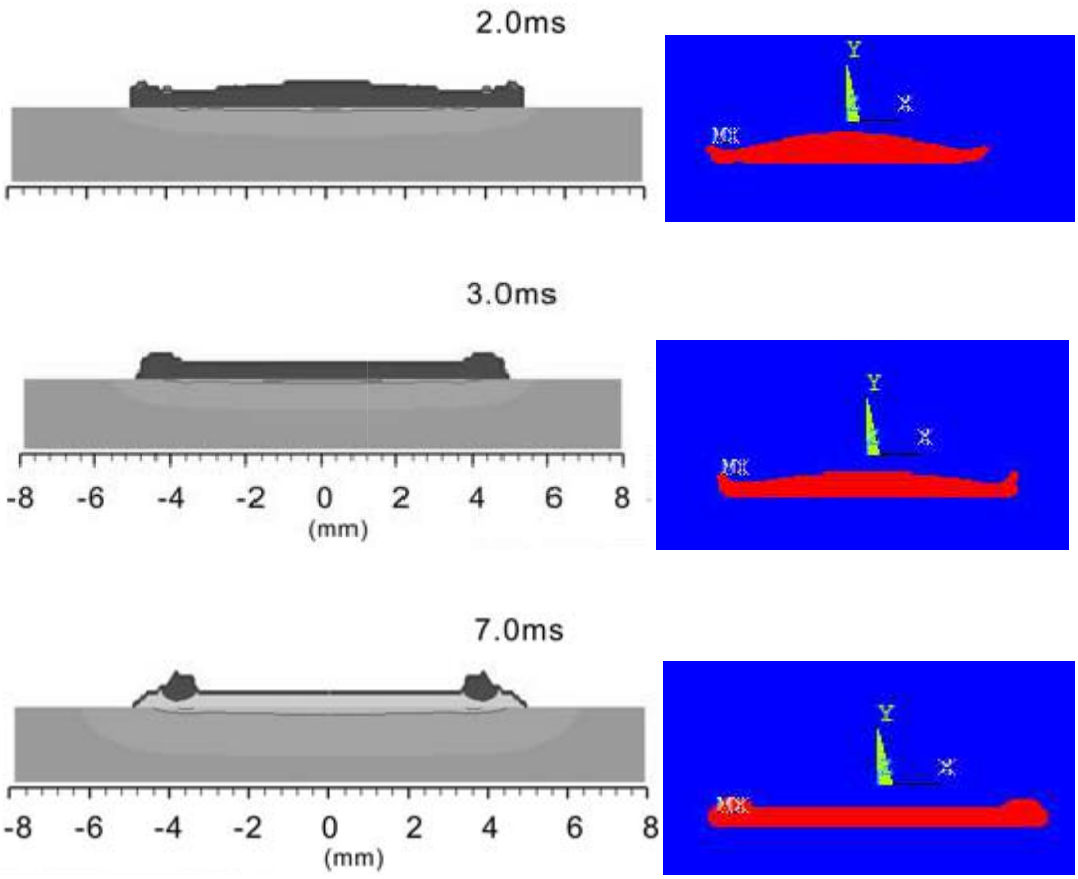


Figure IV.2. Configuration géométrique et conditions d'étalement de l'identification.

La figure IV.2 représente le résultat de simulation de l'impact d'une particule en aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse d'impact de 3 m/s sur un substrat initialement à une température de 200 ° C. La température de la particule prise au-dessus de la température de fusion est de 630 ° C. La gouttelette commence a se propagée à 0.1 ms, le liquide suit la topographie de la surface comme il montre les deux résultats si dessous.





A B

Figure IV.3 .représentation spatiale de la dynamique d'étalement dans les même conditions pour **A :** Expérimental de Mostaghimi **[79]** **B** : présent travail**.**

La figure IV.4 représente comparaison entre les facteurs d'étalement de notre simulation avec expérimentale de Minxia Xue, Yoav Heichal, Sanjeev Chandra et Javad Mostaghimi **[79].**

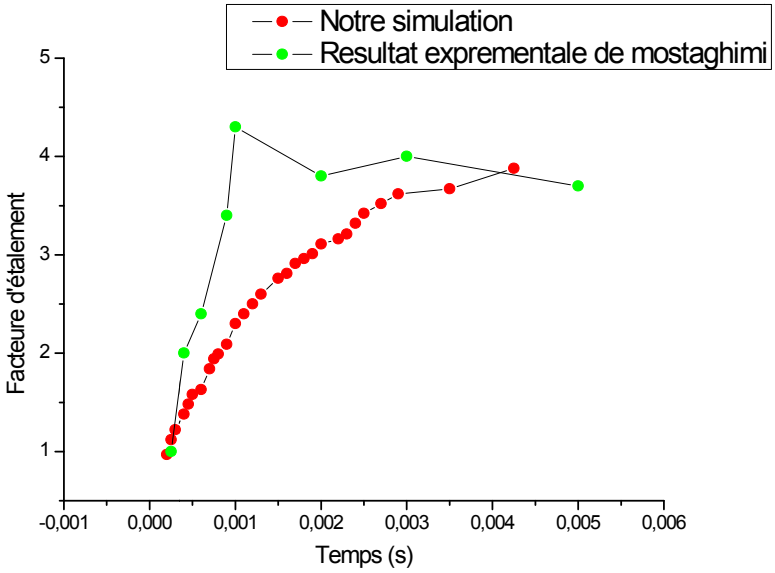


Figure IV.4.facteurs d'étalement

Après la comparaison entre la validation expérimentale de Minxia Xeu ,Yoav Heichal, Sanjeev Chandra, Javad Mostaghimi et notre identification on a obtenu les résultat presque les même.

IV.5.Description du domaine d'application

Dans cette étude on propose de simuler et d'étudier l'influence des diamètres des creux et des pics surfacique de substrat en acier sur l'étalement et la solidification d'une particule en aluminium, pour trois cas (d_1=0.6mm, d_2=0.8mm, d_3=1.2mm) comme c'est représenté sur la figure (IV.5).

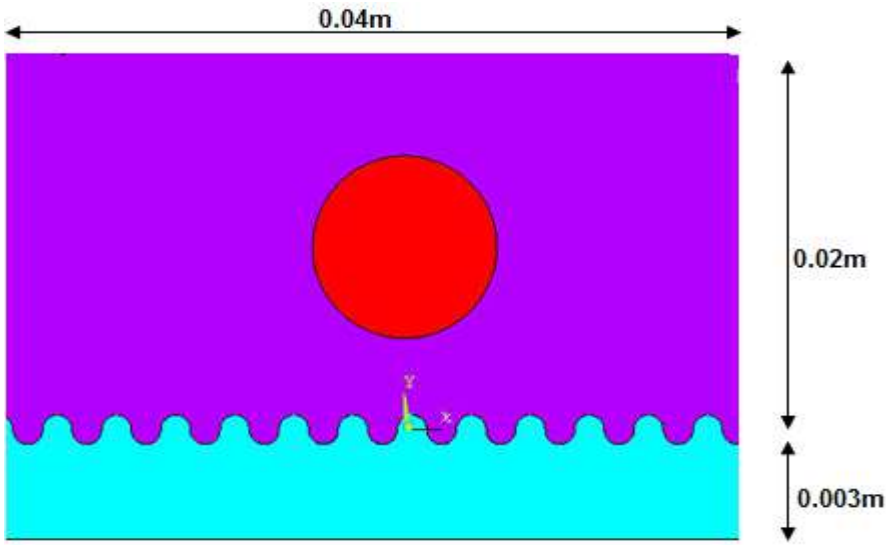


Figure IV.5. Schéma de principe du domaine**.**

On va étudier la variation de trois variables suivant par rapport au temps :

- Représentant la variation de température pour quatre position dans le substrat et cela par rapport au temps.
- Représentant la variation de pression pour trois d'impact par rapport au temps.
- Représentant la variation du d'étalement par rapport au temps.

Le tableaux IV.2.représente la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette qui a une température de 630 C° dans un substrat à 200 C° pour différent type des creux et les pics et pour chaque diamètre.

Les gouttelettes d'aluminium commence a se propagée à 0.3ms.

On remarque dans cette images qu'on a obtenu un bon étalement de gouttelette dans le cas de d=0.6mm à l'instant t=0.7ms, et un bon refroidissement parce que la température est diminue avec une diminution de résistance, pour les deux cas qui restants (0.8mm, 1.2mm) on obtient que l'étalement diminue mais la résistance augmente delà on a une faible solidification.

Donc on peut dire que le bon étalement avec une bonne solidification sont concernés au petit diamètre.

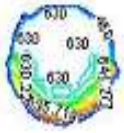
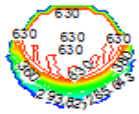
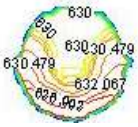
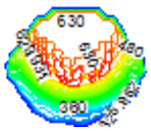
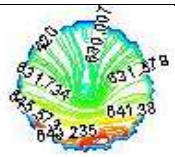
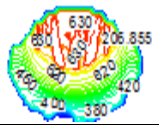
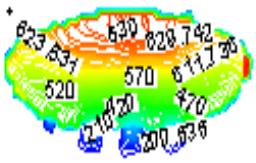
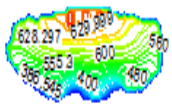
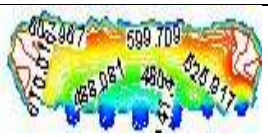
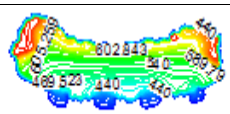
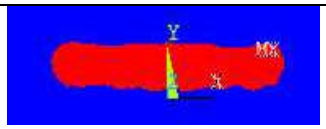
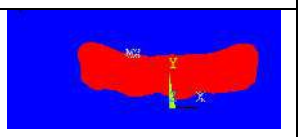
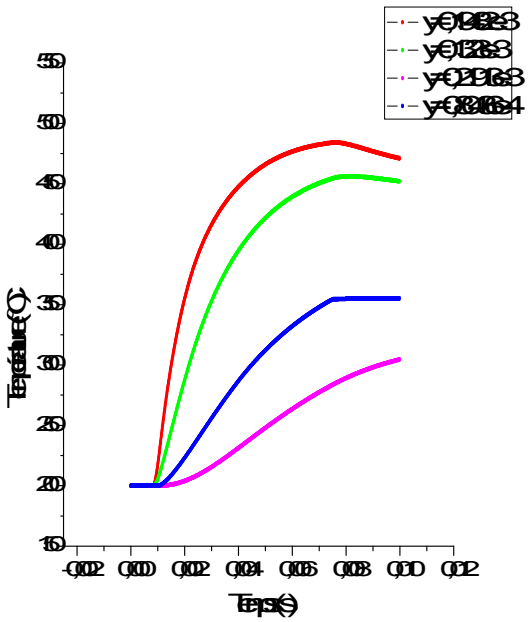
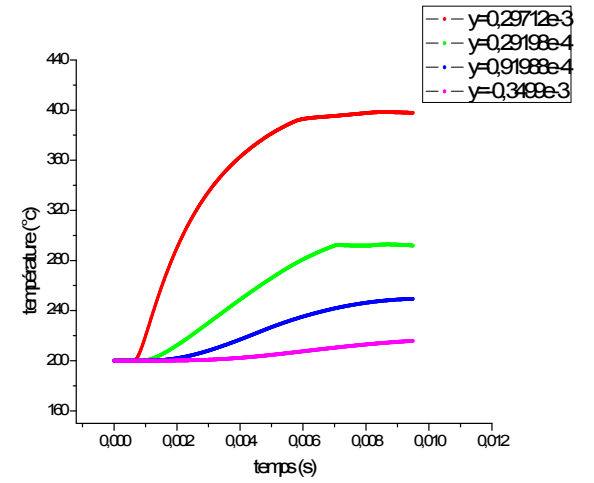
temps	Cas1 d_1=0.6mm	Cas2 d_2=0.8mm	Cas 3 d_3=1.2mm
0.1ms			
0.3ms			
0.7ms			
2ms			
7 ms			
7ms			

Tableau IV.2. Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium. Dans les trios cas de diamètre déférent.

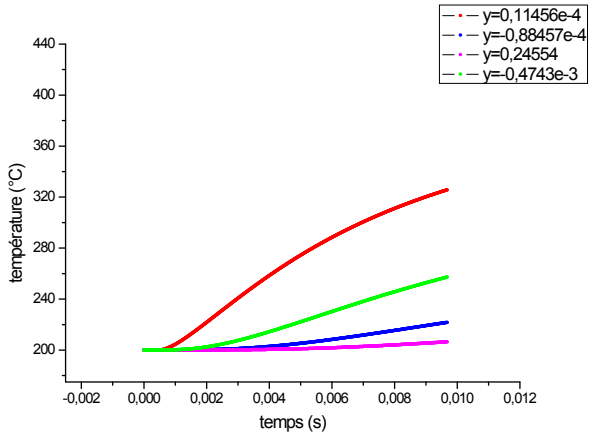
La figure IV.6 (a-b-c) représente une comparaison entre la variation de la température dans le substrat lors de l'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier par rapport le temps. En remarque que pour cas de d=0.6mm le premier contact de la goutte avec le substrat, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement et plus élevées jusqu'à 500°C. La résistance thermique diminue. Mais les valeurs des températures des points au dessous de substrat diminuent. Jusqu'à 220°C quant elle est stable. Et on peut constater aussi que, la température est quasi-constante en profondeur du substrat après l'étalement total de la particule ce qui explique que la solidification ce fait dans la lamelle de manière radiale parallèlement au substrat. Et pour les deux cas qui restent la température augment aussi au point d'impact mais elle reste toujours inferieure à celle du premier cas.



a



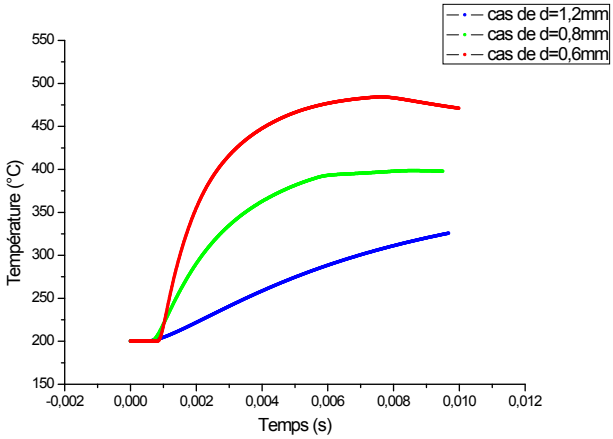
b



c Figure IV.6.les profiles de température dans le temps pour quatre position dans le substrat pour

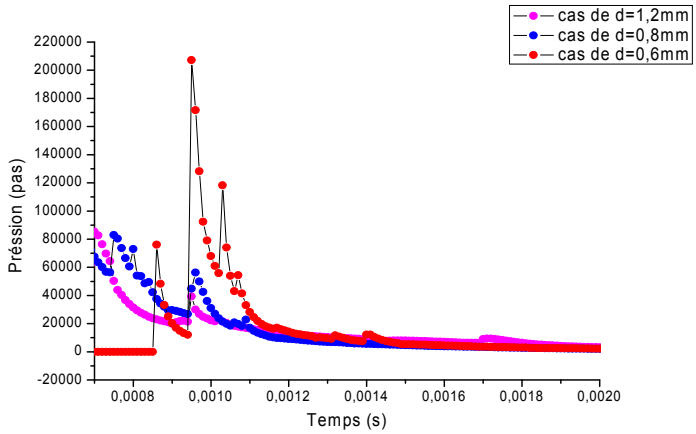
a- d=0.6mm b- d=0.8mm c- d=1.2mm

La figure IV.7.représente une comparaison des profils de température par rapport le temps au point de contact de gouttelette avec le substrat dans les trois cas. On remarque que la température est à son arrivée maximale à T= 500 °C à l' instant t=0.008 s dans le cas de d=0.6mm par rapport les autres cas restant la température est minimum.



La figure IV.7. Les profils de température au point de contact.

La figure IV.18.représente une comparaison entre la variation de la pression au point d'impact de gouttelette avec le substrat lors de l'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier par rapport le temps. On remarque que :
Initialement la pression est plus élevé au point d'impact et son maximum dans le premier cas de d=0.6mm et jusqu'à 210 kPa à t=0.95ms (sous la lamelle) qui permettent un grand accrochage mécanique et adhérence pour son maximum étalement (lamelle/substrat) et qui produit par conséquent une faible résistance de contact et bon solidification et refroidissement parce que la température diminue. Et après on note une diminution jusqu'à une stabilisation à t=1.3ms. Et pour Les deux cas restant (d=0.8mm et d=1.2mm**)** respectivement. La pression est petit et inferieur par rapport le premier cas et l'étalement diminue avec augmentation de la résistance et faible solidification. Donc comme il est noté précédemment pour les petits diamètres on marque toujours que la pression et l'étalement son augmentés.



La figure IV.8. Distribution de la pression au point d'impact de gouttelette avec substrat.

La Figure IV.9.représente une comparaison entre la variation des résultats des facteurs d'étalement pour la goutte d'aluminium. Dans le modèle proposé de simulation entre trois cas de diamètre des creux et des pics surfacique de substrat en acier (d_1=0.6mm, d_2=0.8mm, d_3=1.2mm), L'étalement et la forme de la goutte sont semblables au cours de l'impact pour les trois cas par exemple, dans le cas de d=0.3mm, le facteur d'étalement maximale jusqu'à la valeur 0.0052 à t =5ms et après la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement final (0.0045) à t=8 ms et pour les deux cas restant l'étalement diminué si le diamètre des creux et des pics démunie.

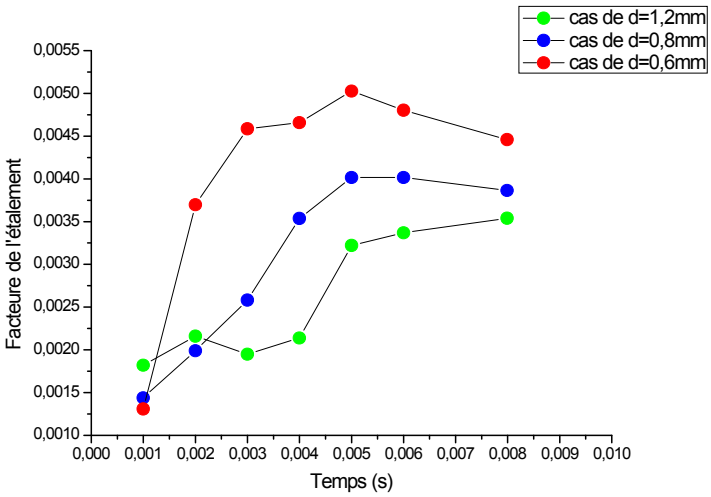


Figure IV.9.résultats des factures d'étalement pour la goutte.

Conclusion

D'après Cette étude, On note plusieurs points tels que les caractéristiques importants qui influencent sur l'étalement, la solidification et le refroidissement de gouttelette d'aluminium sur un substrat de forme en acier, ainsi :

- la pression d'impact de la particule qui est liée à l'adhérence au substrat, cependant les particules génèrent une pression relativement importante par leur temps d'application dans le cas des pics et des creux de diamètre 1.2mm.
- La pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une bonne adhérence entre goutte/substrat. Alors la pression d'impact des particules est liée à l'adhérence à la paroi, et la pression est influencée par le diamètre des creux et pics.
- la température est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle), elle est influencée par le diamètre des creux et pics.
- La formation de lamelle dans le premier cas de r=0.3mm est bien étalée, donc le diamètre des creux et pics joue un rôle important sur la formation de lamelle.

Conclusion générale

Dans ce travail, notre objectif était d'étudier l'expérience numérique de la formation de lamelle, dans un procédé de revêtement et qui possède une grande importance dans l'industrie, parmi les matériaux utilisés dans ce procédé on cite l'aluminium ; un matériau fortement utilisé dans les barrières thermiques, l'isolation électrique….
Expérimentalement en raison des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la microseconde et du micromètre.il est donc nécessaire de faire appel à des outils numériques complexes pour prendre en compte les divers aspects thermiques et dynamiques.

Dans le premier chapitre, on a étudié la projection thermique avec ses classement (projection a la flamme et projection plasma et projection par arc) et, ses paramètres et ses caractéristiques, avec un état de l'art sur le sujet de l'impact d'une goutte sur substrat et les études sur la physique associée.

Dans le deuxième chapitre, on a décrit les équations mathématiques (l'équation de continuité, l'équations de quantité de mouvement, et l'équation de conservation d'énergie). On a expliqué aussi le modèle thermique.

Dans le troisième chapitre, la méthode numérique que nous avons utilisé (la méthode VOF) génère des gouttes secondaires issues de la résolution numérique lorsque l'interface s'allonge et les contraintes deviennent trop importantes. Malgré tout, il semble que le schéma VOF offre dons notre cas de meilleurs possibilités en vue d'ajouter au système les équations de la thermique qui vont se baser sur la description de l'interface.

Dans le quatrième chapitre, on a fait la simulation en 2D cartésien sur un cas de validation (java Mostaghimi, Yoav Heichal, Sanjeev Chandra, Minxia Xu) , après on a étudié le cas des creux et des pics surfacique afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation et sur l'impact des gouttes sur totalement fondues, les résultats obtenues montrent que les deux paramètres jouent un rôle important sur la morphologie finale du lamelle, la projection de particule (goutte) sur un substrat est une technique largement utilisée dans l'industrie.
ainsi que la solidification de la maille refusions éventuelle par interaction particule substrat sont difficiles à analyser.
Ainsi que on a représenté les résultats de simulation (les graphes de vitesse et pression ou point d'impact, et les variations des températures sur le substrat)

Ces résultats obtenu par logiciel ANSYS.

Les références bibliographiques

[1] : P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs, (2001) Quo Vadis Thermal Spraying, J. of Thermal Spray Technology 10 (1),p. 44 – 46.

[2] Planche M.P., Fauchais P., Coudert J.F., Betoule O., Valletoux H. (1994)"Comparison of D.C. plasma jet velocity distributions for different plasma gas mixtures : Ar-H2, Ar-He, Ar-He-H2", Proceedings of the 7th National Thermal Spray Conference, June 1994, Boston, Massachusetts, p. 349-354.

[3] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Projection_thermique

[4] : http://www.bodycote.com/fr-FR/services/surface-technology/flame-spraying.aspx

[5] :http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Projection_thermique&oldid=97553172 ». Catégorie :

[6] : http://www.metrasur.com/traitement-de-surface-projection-hp-hvof.html

[7] : http://www.tcpp.fr/html/flammepoudre.htm

[8] : http://www.tcpp.fr/html/flammefil.htm

[9] : http://www.tcpp.fr/html/flammefil.htm

[10] : http://www.tcpp.fr/html/arcfil.htm

[11] : http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-de-surface-des-metaux-par-voie-seche-et-en-milieu-fondu-42360210/revetements-par-projection-thermique-m1645/projection-par-arc-electrique-entre-deux-fils-m1645niv10003.html

[12] : http://www.tcpp.fr/html/arcfil.htm

[13] :http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Projection_thermique&oldid=97553172 ». Catégorie

[14] : fr.wikipedia.org/wiki/Découpage_plasma

[15] : Vincent DEBOUT Contribution à l'Etude des Propriétés Optiques de Dépôts Plasma de Zircone Yttriée : Influences de leurs Caractéristiques Microstructurales et Physico-chimiques 2007 et MOREAU ET AL, 1987.

[16] : M. Fadhel BEN ETTOUIL Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc 2008.

[17] : E. Leveroni and E. Pfender, A unified approach to plasma particle heat Transfer Under non continuum and non-equilibrium conditions. Int. Journal of Heat and Mass Trans., vol.33 (1990), 1497-1509.

[18] : X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Nozzle Configuration Gas Pressure and Gas Type on Coating Properties in Wire Arc Spray, Thermal Spray Technology, Vol. 8 (No.4), 1999, pp565-575

[19] J. Wilden, A. Wank, Wires for Arc and High Velocity Flame Spraying Wire Design,Materials and Coating Properties: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp609-617

[20] : http://www.hypertherm.com/fr

[21] : http://www.rocdacier.com/ressource.n.14/cours-sur-la-decoupe-plasma-machine-et-procede-.html

[22] : C. Baudry, Contribution à la modèle instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma. Thèse de l'université de
Limoges, (2003)

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

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

[25] :http://www.henkelman.com/fr/technologie/injection-de-gaz[24] :http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296213900001196

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

[27] : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296213900001196

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

[29] : F. Rogers, Benefits and Technology Developed to Arc Spray 3/16 inch Diameter Wires Used for Corrosion Protection of Steel: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp691-698.

[30] : J. H. Clare, D.E. Crawmer, Thermal Spray Coatings in Metallic Coating Processes, in Metal Handbook, 9th Ed.,Vol. 5, Surface Cleaning Finishing and Coating, (pub.) ASM, International, OH USA, 1982, pp361

[31] X. Wang, D. Zhuang, Effect of Atomising Gas Pressure on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp587-592

[32] X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Gas Velocity and Particle Velocity on Coating Adhesion in Wire Arc Spraying: Practical Solutions for Engineering Problems, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1996), pp807-811.

[33]: H. Fukunama, A. Ohmori, Behavior of molten droplet impinging on flat surfaces, in Thermal Spray: Industrial Applications, (ed.) C.C. Brandt and S. Sampath, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA,1994, pp 563-568.

[34] : Vincent DEBOUT Contribution à l'Etude des Propriétés Optiques de Dépôts Plasma de Zircone Yttriée : Influences de leurs Caractéristiques Microstructurales et Physico-chimiques 2007 et MOREAU ET AL, 1987.

[35] :Département Génie Mécanique
Université de Technologie Belfort-Montbéliard

[36] :Martine Coddet
LERMPS
Université de technologie de Belfort-Montbéliard

[37] : Présenté au Colloque international sur la corrosion à haute température, Université de Provence, Marseille 13331, France, 7-11 juillet, 1986.

[38] : V.V. SOBOLEV, J.M. GUILEMANY, Oxidation of coatings in thermal spraying, Materials Letters 37, 1998, p.231-235

[39] A.A SYED, Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc,

Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2004

[40] : Christophe MENDIBIDE (Ingénieur ENSEEG
Soutenue le 10 octobre 2003 devant la Commission d'examen)téhse

[41] : Zirari Mounir «Modélisation de la construction d'un dépôt par projection thermique : de la formation d'une lamelle à l'empilement des couches thèse de doctorat, université Saad dahlab, Blida ; Algérie.

[42] A.M. Ahmed, R.H. Rangel, V.V. Sobolev, J.M. Guilemany, In-Flight Oxidation of Composite Powder Particles During, Thermal Spraying, Heat and Mass Transfer, 44, 2001, p. 4667-4677

[43]: Escure C., Vardelle M., Vardelle A., and Fauchais P., (2001)"Visualization of the Impact

of Drops on a Substrate in Plasma Spraying Deposition and Splashing Modes", Thermal Spray, New Surface for a New Millenium, C.C. Berndt, K.A. Khor, and E.F. Lugscheider, ed., ASM International, Materials Park, OH, pp. 805-12.

[44]: L. Xu, W. Zhang, S. Nagel. Drop splashing on a dry smooth surface. Phys Rev Lett 2005. 94 (18) No. 184505.

[45] :H. Fukanuma, in: C.C. Berndt (Ed.), Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, Cincinnati, U.S.A., October 7– 11, 1996, 9th National Thermal Spray, Conference proceeding, ASM International, 1996, p. 647.

[46]: H. Zhang, X. Y. Wang, L. L. Zheng, X. Y.Jiang (2001) "Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 44, pp. 4579-4592.

[47]: Z. Zhao, D. Poulikakos, J. Fukai, Heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate—I. Modeling, Int. J. Heat Mass Transfer 39 (1996) 2771–2789.

[48] :M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi (2002) Int J Heat Mass Transfer 45:2229

[49]: M. Pasandideh-Fard, V. Pershin, S. Chandra, J. Mostaghimi (2002) J Therm Spray Techno11:206

[50]: Bussmann M, Mostaghimi J, Chandra On a three-dimensional volume tracking model of droplets, Physics of Fluids, 11, 1999, pp 1406-1417.

[51] :R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S. Chandra, M. Charmchi (2003) J Therm Spray Technol 12:53

[52] :http://fr.wikiversity.org/wiki/Conservation_de_la_masse_et_%C3%A9quation_de_continuit%C3%A9/Forme_locale

[53] :http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO_HTML/node29.html

[54] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Conservation_de_l%27%C3%A9nergie

[55] : M.Rappaz, M.Bellet, and M.Deville. (2003) Numerical Modeling in Materials science and Engineering. Springer series in Coputational Mathematics, Springer-verlag edition.

[56] : http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/transferts-thermiques-42214210/transferts-de-chaleur-avec-changement-d-etat-solide-liquide-be8240/

[57] :PLANCHE M.P. Contribution à l'étude des fluctuations dans une torche à plasma. Application à la dynamique de l'arc et aux mesures de vitesses d'écoulement. Thèse de doctorat d'université. Limoges : Université de Limoges, 1995, 140 p.

[58]: SAMPATH S., HERMAN H. Rapid solidification and microstructure development during plasma spray deposition, Journal of Thermal Spray Technology, 1996, 5, 4, p. 445-456.

[59]: PLANCHE M.P., BOLOT R., LANDEMARRE O., CODDET C. Comparison between experimental and numerical results obtained on in-flight particles

characteristics, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, (ed.) C. Codet, (Pub.) ASM International OH-USA, 1998, p. 355-360.

[60]:HRABOVSKY M., KONRAD M., KOPECKY V., HLINA J. Fluctuations of light intensity in thermal plasma jet generated by water stabilized d.c. arc torch,

Proc. of the International Symposium of Plasma Chemistry, (ed.) J.V.

[61]: FAUCHAIS P., VARDELLE A., DUSSOUBS B., Quo Vadis thermal spraying? J. Thermal Spray Technology, 10, 1, 2001, p 44-66.

[62] :MADJESKI J. Solidification of droplets on a cold surface. International Journal

of Heat Mass Transfert, 19, 1976, p. 325-332.

[63]: M.S. Youssef, Y. Nagano et M. Tagawa. A two-equation heat transfer model for predicting turbulent thermal fields under arbitrary wall thermal conditions. International Journal of Heat and Mass, Transfer, 35 :3095–3104, 1992.

[64]: Manual of Ansys ver 11, Ansys.inc, USA

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

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

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

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

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

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

[71] : Rice, J.G., Schnipke, R.J.,"A Monotone Streamline Upwind Finite Element Method for Convection-Dominated Flows," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 48, pp.313-327, 1985.

[72]: Brooks, A.N. and Hughes, T.J.R., "Streamline Upwind/Petro-Galkerin Formulation for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 32, pp. 199-259, 1982.

[73] : Barber, R.W. and Emerson, D.R., "The influence of Knudsen number on the hydrodynamic development length within parallel plate micro-channels," Advances in
Fluid Mechanics IV, pp. 207-216, 2002.

[74] : Manual of Ansys ver 11, Ansys.inc, USA

[75]: M.Pasandideh-Fard,s.D.Aziz,S.chandra,javad .Mostaghimi numerical simulation of thermal spray coating formation ,in proceeding of the 1 st international thermal spray conference ,Montreal ,Quebec,may 8-11.

[76]: Pershin, I. Thomson, S. Chandra, J. Mostaghimi, Splashing of nickel droplets during plasma spraying, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research.

[77]: 378 J. Madejski, Solidification of droplets on a cold surface, Int. J. Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp 1009- 1013

[78]: Arvind Kumar, Sai Gu*: Modeling impingement of hollow metal droplets onto a flat surface, International Journal of Heat and Fluid Flow 37 (2012) 189–195.

[79]: Modeling the impact of a molten metal droplet on a solid surface
using variable interfacial thermal contact resistance
Minxia Xue ئYoav Heichal Sanjeev Chandra
Javad Mostaghimi
Received: 7 July 2006 / Accepted: 11 October 2006 / Published online: 11 November 2006
_ Springer Science+Business Media, LLC 2006