REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINSTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Dr YAHIA FARES de MEDEA

Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie mécanique



Projet de fin d'étude pour l'obtention de diplôme master en génie mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

Thème

LA COUCHE D'OXYDE ET LA MORPHOLOGIE DE L'ETALEMENT PENDANT LA FORMATION DES LAMELLES LORS DE L'IMPACT OBLIQUE D'UNE GOUTTE D'ALUMINIUM

Réalisé par :

- MAHIEDDINE FAIZA

- GUENDOUZ NABILA

Proposé et diriger par :

Dr. ZIRARI MOUNIR

Promotion : 2015-2016

Remerciements

- ***Avant tout nous remercions « Allah » de nous avoir accordé des connaissances de la science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.***

- ***Nos vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.***

- ***Nos remerciements s'adressent aussi à notre encadreur Dr Zirari Mounir.***

- ***Nous n'oublierons pas la sympathie et le soutien de toutes les personnes que nous avons pu côtoyer au cours de ces années.***



Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A mes chers frères et chères sœurs et aussi à toute la famille

Mahieddine et Djamaii Ainsi que tous mes proches.

A tous mes amies surtout Nasserine Asmaa et Nabila

A tous mes ami(e)s de la promotion 2015-2016.

A tous ceux qui ont une

relation de proche ou de loin avec la réalisation du présent travail.

FAIZA

Dédicace

***J**e dédie ce mémoire*

***A** mes chers parents ma mère et mon père*

***P**our leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

***A** mes frères.*

***A** mes amies.*

***S**ans oublies tout les professeures que soit du primaire, du moyen du secondaire ou de l'enseignement supérieure.*

NABILA

RESUME

Le préchauffage des substrats métalliques par le jet plasma sous atmosphère ambiante peut provoquer l'oxydation de leur surface, influençant les propriétés des dépôts, essentiellement L'adhésion sur les substrats .Il a été montré que les espèces oxydantes dans le jet ainsi que celle de l'atmosphère autour du substrat favorisent l'oxydation de surface.les caractéristiques de la couche d'oxyde sont liées à la nature du substrat, à son environnement, ainsi qu'à la vitesse, à la température et au temps de préchauffage. L'oxydation du substrat peut modifier les propriétés thermiques, la structure cristalline et sa rugosité de surface. Tous ces paramètres ont des effets prononcés sur l'étalement des lamelles. Pour le présent travail nous proposant l'étude numérique de l'influence de la couche d'oxyde sur la morphologie de l'étalement et la formation des lamelles ainsi que les propriétés des dépôts, notamment leur adhérence sur le substrat, dans le cas d'impact oblique de la particule.

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) à l'aide du la méthode(VOF) couplé à un modèle de solidification.

On a trouvé que la présence de la couche d'oxyde elle à une importance par rapport au couplage d'impact oblique sur la formation des lamelles.

Mots clés :

- Impact, goutte, métal, solidification, lamelle, simulation numérique, élément finis : VOF : Ecoulement Modélisation ANSYS.

Abstracts

Preheating of the metal substrates by the plasma jet under ambient atmosphere can cause oxidation of the surface, influencing the deposition properties, mainly the adhesion to substrates .It has been shown that the oxidizing species in the jet and that of the atmosphere around the substrate promote oxidation of surface.les characteristics of the oxide layer are related to the nature of the substrate, its environment, and the speed, temperature and preheating time. The oxidation of the substrate may alter the thermal properties, the crystalline structure and surface roughness. All these parameters have pronounced effects on the spreading lamellae. For this work we offer the digital study of the influence of the oxide layer on the morphology of the spreading and training slats and the properties of deposits, particularly their adhesion to the substrate, in the case oblique impact of the particle.

The impact model estimates the flow dynamics and the passage upon impact (spreading and solidification of the drop) using the method (VOF) coupled to a solidification model.

It has been found that the presence of the oxide layer to it an importance with respect to the coupling oblique impact on the formation of lamellae.

Keywords:

- Impact, drop, metal, solidification, strip, numerical simulation, finite element: VOF: Flow Modeling ANSYS.

ملخص

التسخين المسبق للركائز المعدنية بواسطة البلازما تحت الغلاف الجوي المحيط يسبب أكسدة السطح، والتأثير على خصائص الترسيب، وعلى رأسها الانضمام إلى الركائز وقد تبين أن الأنواع المؤكسدة في البلازما، و الغلاف الجوي حول سطح الركيزة يؤدي إلى تعزيز الأكسدة ترتبط خصائص طبقة الأكسيد لطبيعة الركيزة، بيئته، وسرعة ودرجة الحرارة ووقت التسخين المسبق .أكسدة الركيزة قد يغير الخصائص الحرارية، البنية البلورية وخشونة السطح .كل هده العوامل لها تاثيرعلى نشرالصفائح .لهذا العمل نحن نقدم دراسة رقمية لتأثير على طبقة الأكسيد على تشكل نشر وتدريب الشرائح وخصائص الودائع، وخاصة الالتصاق على الركيزة، في حالة التأثير المائل للجسيمات.

ويقدر نموذج تأثير ديناميت تدفق ومرور على الأثر(نشر وترسيخ الانخفاض) باستخدام طريقة (VOF)بالإضافة إلى نموذج التصلب.

وقد وجد أن وجود طبقة أكسيد لها أهمية بالنسبة لتأثير على تشكيل صفائح.

كلمات البحث:

- أثر، وهبوط، المعادن، التصلب، الشريط، والمحاكاة العددية، العناصر المحدودة.

VOF تدفق النمذجة .ANSYS.

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

Résumé……i

Sommaire…….....iii

Liste Des Figures.……vii

Liste Des Tables.……ix

Nomenclature……..x

Introduction générale……..1

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction……..3

I.1. La projection thermique……..3

I.2.Présentation générale des procédés de projection Thermique……3

I.3.Les prémices de la projection thermique……4

I.4.principe général.....4

I.5.Principaux types de projection thermique……..5

I.5.1.Flamme simple…….5

I.5.1.1.La projection flamme –poudre ……6

I.5.1.2.La projection flamme –fil……..7

I.5.1.3.La projection supersonique par combustion……..8

I.5.1.4.Le canon à détonation……..9

I.5.2.La projection par arc électrique…….10

I.5.2.1. La projection arc-fil ……..10

I.5.2.2. La projection par plasma d'arc soufflé……...11

I.5.3.La projection plasma ……11

I.5.3.1.Fonctionnement de la torche à plasma d'arc ……..11

Torche à arc transféré ……...12

Torche à arc soufflé ……...12

I.5.3.1.1.Amorçage de l'arc.....13

I.5.3.1.2.Le gaz plasmagène 13

I.5.3.1.3.L'injection des gaz plasmagènes 16

I.5.3.2.Formation du jet plasma.....17

I.5.3.3.Ecoulement du jet plasma……18

I.6.Traitement des particules dans le jet plasma……19

I.6.1.Injection de la poudre……20

I.7. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat……22
I.7.1. Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat……22
I.7.2. Etalement de la particule……...23
I.7.3.La solidification des lamelles……25
I.7.3.1.Impact et formation du dépôt ……25
I.8. Caractéristiques microstructurales des revêtements……28
I.9. Substrat……29
I.9.1. Préparation de substrat……..29
I.9.2. Phénomènes d'oxydation……..30
I.9.2.1. Oxydation des gouttelettes en vol……..30
I.9.2.2. Oxydation lors de la formation du dépôt ……...31
I.10. Caractéristiques du dépôt……32
I.10.1. Microstructure……33
I.10.2. Teneur en oxydes et porosité……...33
I.10.3. Adhérence et dureté……34
I.10.4. Resistance à la corrosion……34
Conclusion……...35

Chapitre II : Modélisation mathématique

Introduction……36
II.1.Modèle dynamique……36
II.2. Modélisation de l'écoulement des fluides……37
II.2.1. L'équation de la continuité……...37
II.2.2 .L'équation de quantité de mouvement……37
II.2.3. Équation de l'énergie……...38
II.3. Modèle thermique……38
II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase……..38
II.3.1.1. Méthode à grille mobile……39
II.3.1.2. Méthode à grille fixe……39
II.3.1.2.a. Méthode d'enthalpie……..40
II.3.1.2.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente……...41
II.4. Modèle thermique utilisé……..41
II.5.Calcul d'interfaces……..42
II.5.1. Les méthodes de suivi de front……43
II.5.2. Les méthodes de suivi de volume……44
II.5.3. La Méthode VOF CIAM……..45

Conclusion……..48

Chapitre III : Modélisation numérique

Introduction……49

III.1. Discrétisation des EDP……49

III.1.1. les trois grandes familles de méthodes……...49

III.1.1.1. Méthode des différences finies……50

III.1. 1.2.Méthode des volumes finis……..51

III.1.1.2.1.Méthode Volume de Fluide VOF (Volume Of Fluide)……51

III.1.1.3.Méthode des éléments finis……..52

III.1.1.3.1. Démarche éléments finis……..52

III.1.1.3.2.Organigramme d'un logiciel élément finis……53

III.1.1.3.3. Présentation de la méthode……...54

III.2. Forme générale des équations du système [104]……54

III.3.choix d'un maillage……..55

III.3 .1.Discrétisation……..56

III.3.1.1.Terme temporelle……..57

III.3.1.2. Terme d'advection……...58

III.3.1.3. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)……58

III.3.1.4. Method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)……60

III.3.1.5. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)……61

III.3.2.Terme de Diffusion……..61

III.3.3.Termes source……..62

Conclusion……..62

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction……...63

IV.1. Logiciel d'analyse d'ANSYS……..63

IV.2. Matériaux utilisés……64

IV.2.1. L'aluminium……...64

IV.2.2. le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation [108]65

IV.3. Identification……65

IV.4. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus……66

IV.5. Présence de la couche d'oxyde……67

IV.6.Présence de la couche d'oxyde sous forme de pique……68

IV.7.L'impact oblique……69

Conclusion……..74

Conclusion Générale……..……..**75**
Références……...xiii

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Schéma de principe de la projection thermique…….3

Figure I.2 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [22]……...5

Figure I.3 : Projection a la flamme [23]……..6

Figure I.4 : Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre [24]…….7

Figure I.5 : Schéma d'un pistolet flamme fil……...8

Figure I.6 : Schéma du procédé HVOV……..9

Figure I.7 *:* Schéma de fonctionnement du canon à détonation……..9

Figure I.8 : Schéma de procédé arc fil……...10

Figure I. 9 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé……...11

Figure I.10: Torche plasma à arc transféré……....12

Figure I. 11 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma……..12

Figure I. 12 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes. [29]……..14

Figure I. 13 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. [29]…….15

Figure I. 14 : Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. [29]……16

F**igure I .15** : schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma……17

Figure I. 16 : Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma à courant continu ……..18

Figure I.17 : Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc……18

Figure I.18 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant ……19

Figure I.19 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale) ……..21

Figure I .20 : Modes d'impact [34]……23

Figure I.21 : Schéma d'écrasement de la particule [39]……24

Figure I.22 : Influence de vitesse et température des particules d'alumine projetées par plasma avant impact sur la morphologie des lamelles……..26

Figure I .23 : Morphologies de lamelles obtenues sur un substrat en acier……...28

Figure I.24 : Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette [58].L'oxydation en vol peut être donc relativement importante et ne doit pas être sous-estimée……...31

Figure I.25 : écrasement de particules sur des aspérités……32

FigureI .26 : processus du dépôt……..33

Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon [82]……...36

Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température [92]…….38

Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface……...41

Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de front…….43

Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [96,97]……44

Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [98]……...45

Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique [99]……46

Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps [86]……47

Figure III.1 : Méthode de discrétisations [98] ……..50

Figure III.2 : Organigramme d'un logiciel éléments finis [103]……...54

Figure III.3 : (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique……..56

Figure III.4 : Approche de ligne de courant d'Upwind [105]……...59

Figure IV.1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS…….63

Figure IV. 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification……..65

Figure IV. 3 : Facteur d'étalement(cas identification)……...67

Figure IV. 4 : Schéma représente la couche d'oxyde……67

Figure (IV. 3a) cas d'éclaboussement…….68

Figure (IV. 3b) bien etalemment…….68

Figure IV. 5 : représente la couche d'oxyde se forme de pique……68

Figure IV. 6 : Facteur d'étalement(présence de la couche d'oxyde se forme de pique)……...69

Figure IV. 7: Schéma représente l'impact oblique……69

Figure IV. 8 : schéma représente l'étalement……70

Figure IV. 9 : schéma représente les températures……70

Figure IV.10 : profiles de température dans le temps pour cinq positions dans substrat……..70

Figure IV. 11 : schéma représente les pressions……71

Figure IV.12 : la variation de la pression d'impact pour trois point à l'interface particule / substrat.71

Figure IV.13 : schéma représente l'éclaboussement……72

Figure IV.14 : profiles de température dans le temps pour cinq positions dans substrat…….72

Figure IV.15 : la variation de la pression d'impact pour trois point à l'interface particule / substrat.73

Figure IV. 16 : Facteur d'étalement(pour l'impact oblique)…….74

LISTE DES TABLES

Tableau III.1 : Tableau de Représentation d'équation de transport. [54]……..55

Tableaux IV.2 : le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation ……65

Tableaux IV.3 : impact séquentiel d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C……..50

Nomenclature

Lettres latines

Notation	Signification	Unité
a	Diffusivité thermique	[m².s^{-1}]
Cp	Capacité calorifique massique à pression constante	[m².$s^{-2}.K^{-1}$]
D	Diamètre de goutte	[m]
D_g	Distance entre deux gouttes voisines	[m]
D_i	Diamètre initial de goutte	[m]
E_c	Energie cinétique	[N.m]
E_p	Energie potentielle	[N.m]
f_s	Fraction solide	
F_o	Nombre de Fourier thermique	
g	Accélération de pesanteur	[m. s^{-2}]
h	Hauteur de goutte	[m]
H	Enthalpie	[J]
K	Nombre de Sommerfeld	
m	Masse	[Kg]
Oh	Nombre d'Ohnesorge	
P_c	Nombre de Peclet	
P_r	Nombre de Prandtl	
r	rayon de goutte	[m]
R_a	Nombre de Rayleigh	
R_e	Nombre de Reynolds	
R_{TC}	Résistance thermique de contact	[K.m².W^{-1}]
S_c	Terme source ou puits changement de phase	[W. m^{-3}]

Ste	Nombre de Stefan	
T	Température	[°K]
T	Temps	[s]
u_i	Composante de la vitesse instantanée suivant i	[m. s^{-1}]
V	Volume	[m^3]
V_i	Vitesse d'impact	[m. s^{-1}]
v_{ref}	Vitesse de refroidissement en DSC	[K. min^{-1}]
W_e	Nombre de Weber	
x_i	Coordonnée cartésienne suivant la direction i, x, y, z	[m]
z	Altitude	[m]

Lettres grecques

α	Fraction cristalline	
β	Coefficient de compressibilité	[K^{-1}]
θ	Angle de contact	[°]
λ	Conductivité thermique	[W. m^{-1}. K^{-1}]
Φi	Fonction de présence des fluides	
σ	Tension superficielle	[$N. m^{-1}$]
μ	Viscosité dynamique	[$Pa.s$]
$\emptyset$	Variable généralisée	
$C_\emptyset$	Coefficient d'advection transitoire	
$\Gamma_\emptyset$	Coefficient de diffusion	
ρ	masse volumique	[$kg. m^{-3}$]

Abréviation

APS	Atmospheric Plasma Spraying
HVOF	High Velocity Oxyfuel Flame
CIAM	Construction de l'Interface Affine par Morceaux
CL	Condition aux Limites
EF	Elément Finis
TVD	Total Variation Diminishing
VOF	Volume of Fluid (volume de fluide)
MSU	Monotone Streamline Upwind Approach
SUPG	Stream line Upwind/Petro-Galerkin
COLG	Approche Colloquée De Galerkin
2D	Deux Dimensions

Introduction générale

L'étude de l'étalement d'une goutte impactant une surface a depuis longtemps intéressé de nombreuses équipes de recherche, que ce soit pour les imprimantes dites à jet d'encre, la peinture au pistolet, les gouttes de pluie, et entre autres, la projection thermique, objet de cette étude [1-3] [19].

Dans le domaine de la projection thermique, procédé permettant de projeter des particules dans un état fondu ou semi fondu pour élaborer un dépôt, l'étalement de ces particules sur la surface du substrat influence fortement les caractéristiques du dépôt [4-5]. En effet, du fait des cinétiques d'étalement et de refroidissement des particules impactant le substrat, le dépôt est constitué d'un empilement successif de lamelles. Une des qualités premières d'un revêtement est une bonne adhérence, la première couche de lamelles est donc essentielle à sa durée de vie. L'interface doit être la plus continue possible, c'est-à-dire exempt de vide, fissures, cavités [6-7]. Pour étudier la formation de cette couche, la première étape consiste à observer, sur un substrat lisse non encore recouvert, le comportement à l'impact d'une particule[8].

De nombreuses études furent menées sur le procédé de projection thermique, et ont permis de trouver des conditions de fonctionnement en vue d'obtenir un dépôt adhérent, de structure convenable, de par sa compacité et son homogénéité. Néanmoins, ces études, où seule la forme finale de la lamelle était examinée, n'ont pu permettre une bonne compréhension du comportement de la goutte suivant les différentes conditions d'impact.[9][10]. Puis le développement de modèles a permis d'émettre des hypothèses sur l'étalement de la particule et le processus d'éjection [4] [11-13][11]. Pour confirmer la véracité de ces modèles, l'obtention de résultats expérimentaux devint nécessaire. Cependant, dans le procédé de projection thermique, les particules projetées ont un diamètre de quelques microns et les vitesses d'impact sont de l'ordre de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres par seconde. L'étalement de la particule et sa solidification se produisent en quelques microsecondes [17]. Il est alors très difficile de suivre l'étalement de la particule sur la surface même avec la plus rapide des caméras qui a actuellement une fréquence d'acquisition d'une image/µs. La recherche s'est alors orientée vers l'observation de l'impact de particules de taille millimétrique [12] [14-16][15] [18]. Les observations sont alors plus simples car les temps d'étalement sont de l'ordre de la milliseconde. Du fait de l'augmentation de la taille de [2] la particule, les résultats obtenus à l'échelle millimétrique ne sont peut-être pas directement transposables à l'échelle micrométrique.

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact oblique et l'étalement des substrats avec solidification des lamelles, pour se faire nous avons choisi des particules en aluminium totalement fondue impactant obliquement sur un substrat ayant une forme de pics surfacique cylindrique à six angle respectivement (1°,3°,5°,7°,9°,11°).

Notre travail est présenté en quatre chapitres :

- Le premier chapitre consiste en un rappel bibliographique sur la projection thermique est ces différents procédés, l'écoulement du jet plasma ainsi que

l'impact, l'étalement et la solidification de la lamelle il concerne également les caractéristique du dépôt.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié.
- Le troisième chapitre est dédié à la résolution numérique et les méthodes de calcul. Dans le dernier chapitre on se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact oblique d'une gouttelette d'aluminium incliné $(1°, 3°, 5°, 7°, 9°, 11°)$ sur un substrat rugueux obtenus par le code de calcule ANSYS.

Notre travail se termine par une conclusion générale .

Introduction

Cette partie représenter les applications des matériaux et les techniques d'élaboration des dépôts constituer par projection thermique. Les fondements et les principes dépendent les différant types des projections, ainsi que les mécanismes 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.

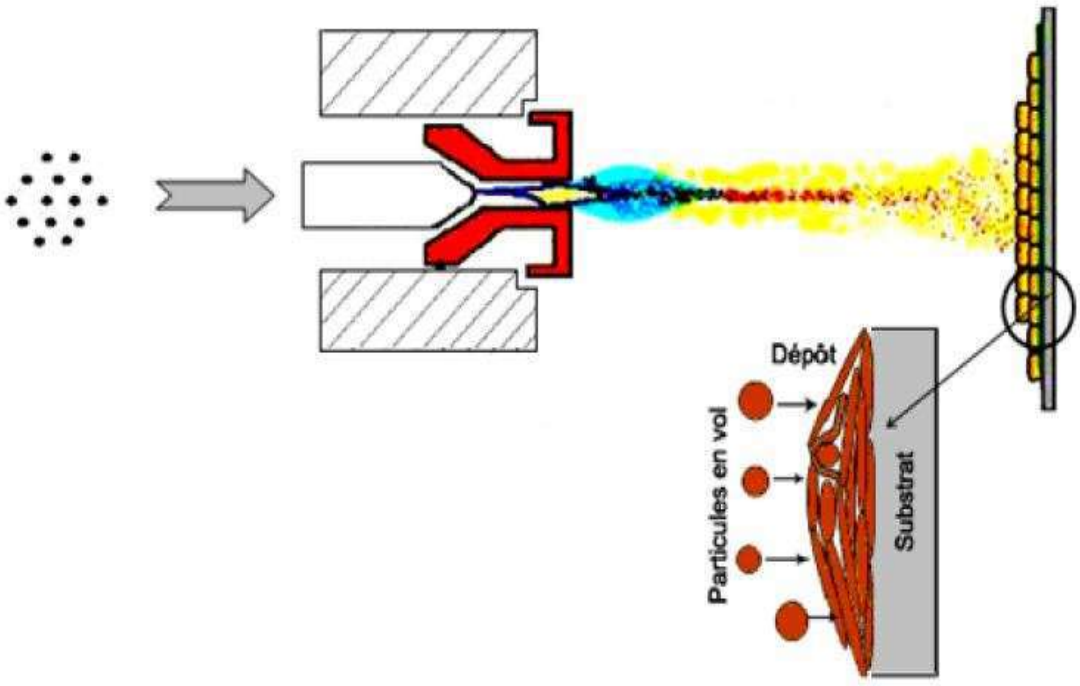


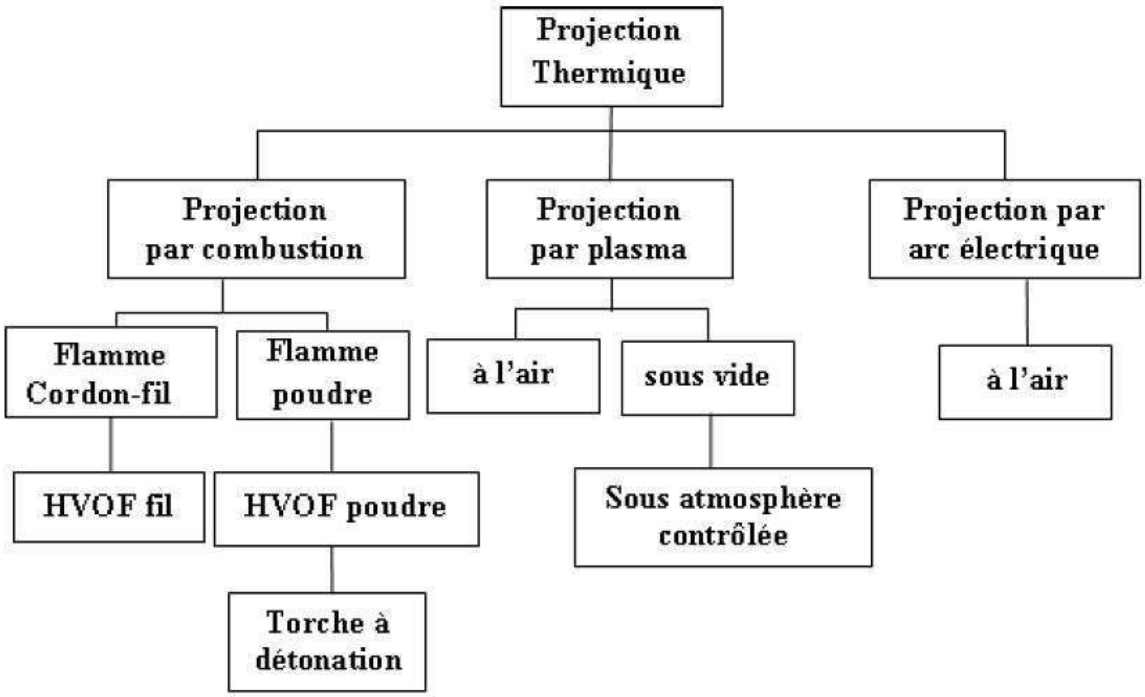
Figure I.1: Schéma de principe de la projection thermique.

I.2.Présentation générale des procédés de projection Thermique

La projection thermique est une famille de procédés de formation d'un revêtement sur des pièces industrielles.

Les matériaux à projeter sont généralement sous forme de poudre, de fil ou de baguette et sont soumis à une source de chaleur. Les procédés de fabrication de revêtement sont variés et utilisent différentes sources de chaleur : la projection flamme poudre, la projection flamme fil,

l'arc électrique, la projection plasma, la projection par flamme supersonique (HVOF) et le canon à détonation.



I.3.Les prémices de la projection thermique

C'est en observant le dépôt provoqué par l'impact d'une balle de plomb contre un mur en ciment que Shop, un ingénier zurichois ,eut l'idée en 1909 de projeter du plomb fondu avec un vaporisateur puis du plomb sous forme de poudre à travers un flamme [20].La projection thermique était née et a rapidement été mise en application .les premières application industrielles sont apparues au début de la première Guerre mondiale pour revêtir la face arrière des obus avec da l'étain. L'industrie mécanique commence à utiliser cette technique après la seconde Guerre mondiale pour la rénovation de pièces usagées.

I.4.principe général

La technique de projection thermique consiste en l'introduction de particules dans un flux de gaz énergétique pour être fondues ou portées à l'état plastique et accélérées vers un substrat sur lequel elles s'écrasent et se solidifient sous forme des lamelles. L'empilement des particules écrasées sur le substrat constitue alors le revêtement qui présente une structure irrégulière pouvant contenir des oxydes, des porosités et des fissures. Suivant le procédé de projection thermique, deux paramètres peuvent caractériser le système. Le premier est l'énergie thermique, le second est l'énergie cinétique [21]. La

figure (I.2) présente alors les caractéristiques typiques des différents procédés de projection thermique.

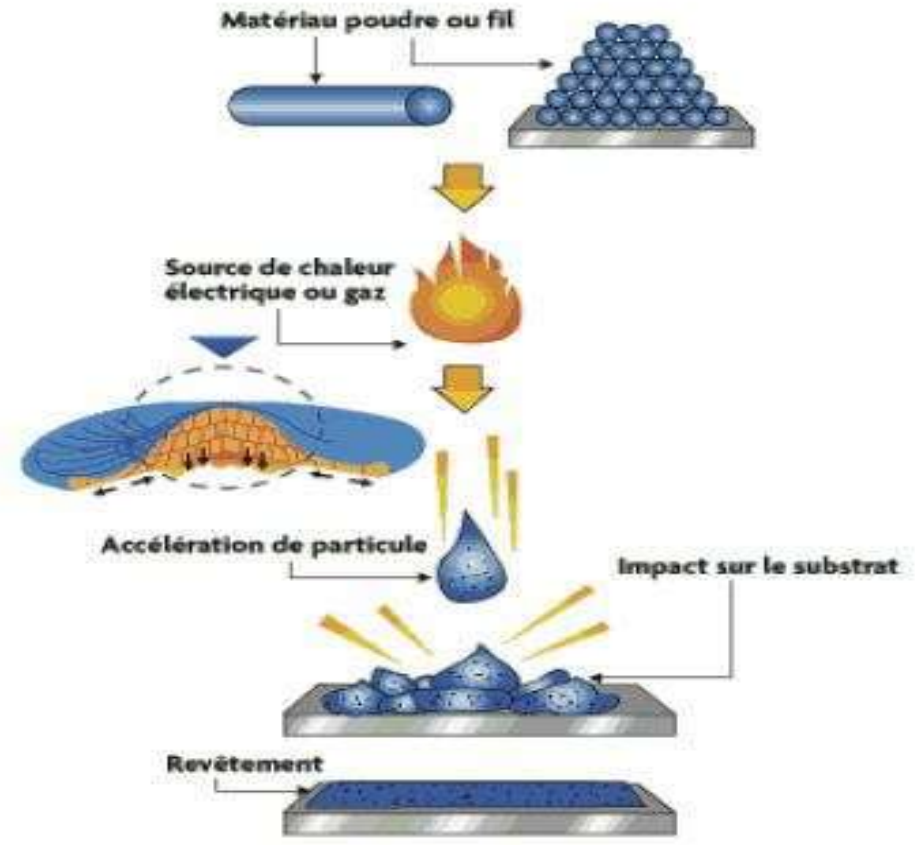


Figure I.2 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [22]

I.5.Principaux types de projection thermique

Il existe de nombreuses manières de réaliser la projection thermique comme : la projection par chalumeau, par arc fil, par flamme supersonique et par plasma d'arc soufflé

I.5.1.Flamme simple

Ce procédé utilise la combustion d'un gaz pour projeter le matériau d'apport sur le substrat. En général, 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.

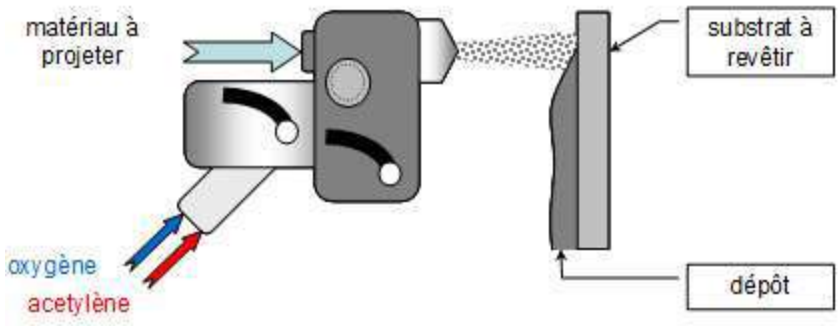


Figure I.3 : Projection a la flamme [23]

I.5.1.1.La projection flamme –poudre

Dans ce procède la poudre utilisée pour élaborer les dépôts est injectée dans la flamme soit a l'aide d'un venturi place entre le réservoir de poudre et la chambre a combustion du pistolet, et utilisant une partie de l'oxygène servant a la combustion, soit avec un distributeur externe en utilisant un gaz porteur neutre comme l'argon, qui n'intervient pas dans la réaction de combustion.

Dans les deux cas, la poudre est transportée jusqu' a la buse du pistolet, traitée par la flamme et projetée sur le substrat soit par les gaz de combustion, soit dans la majorité des cas, par un jet d'air qui accélère les particules.

La vitesse des particules projetées est faible, inferieure a 100 m/s, et la distance entre la buse et le substrat est compris entre 100 et 200 mm pour la projection de métaux et entre 70 et 100 mm pour certaines céramiques. Ce procède permet d'élaborer des dépôts de quelques centaines de µm a quelques mm d'épaisseur, sans échauffement important du substrat. La projection d'aciers, d'alliages a bas point de fusion, de certaines céramiques ou de polymères est possible en utilisant ce procède. Il est apprécie pour son cout très abordable (cout des installations inferieur a 15.000 €) et est utilise dans l'industrie pour des applications telles que l'isolation thermique ou électrique, la résistance a l'usure, a la corrosion, sur des pièces neuves ou usagées.

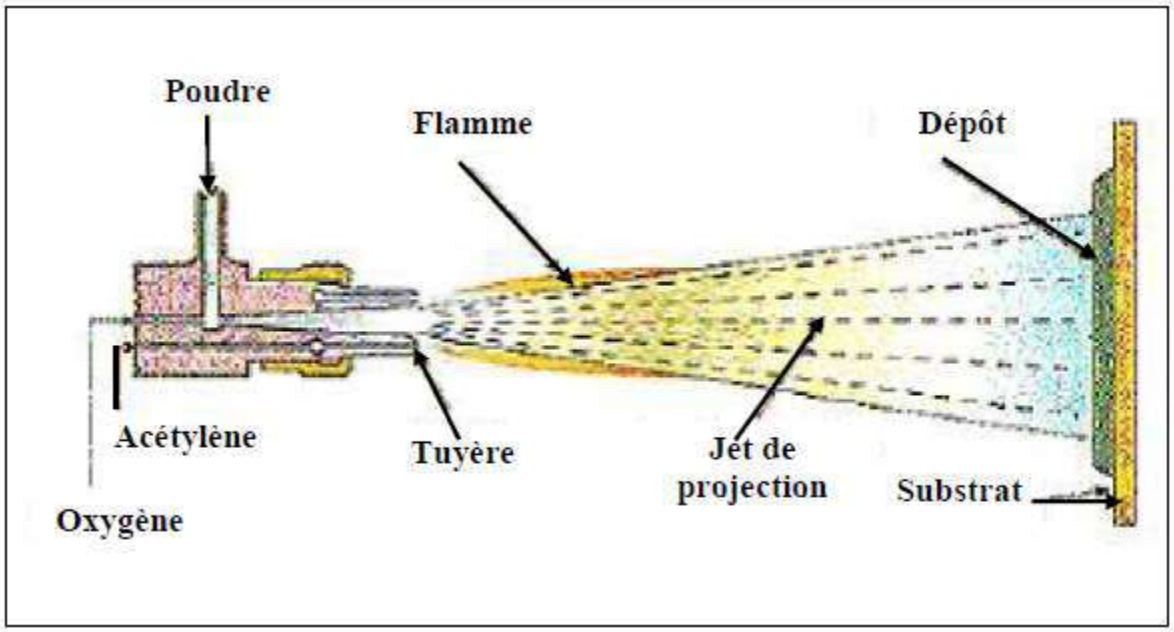


Figure I.4 : Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre [24].

I.5.1.2.La projection flamme –fil

Dans cette technique (fig. I.5) le matériau d'apport est introduit dans le centre de la flamme sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre et qui ne sert qu'à faire fondre le matériau. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, celui-ci sert à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée (v=150m/s), la température du bout de fil peut atteindre 0.95 fois la température de la flamme ce qui permet la projection des céramiques, à des taux horaires de dépôts qui varient de 1 à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, les propriétés de dépôts désirées et les diamètres de fil ou de baguettes utilisés [24,25].

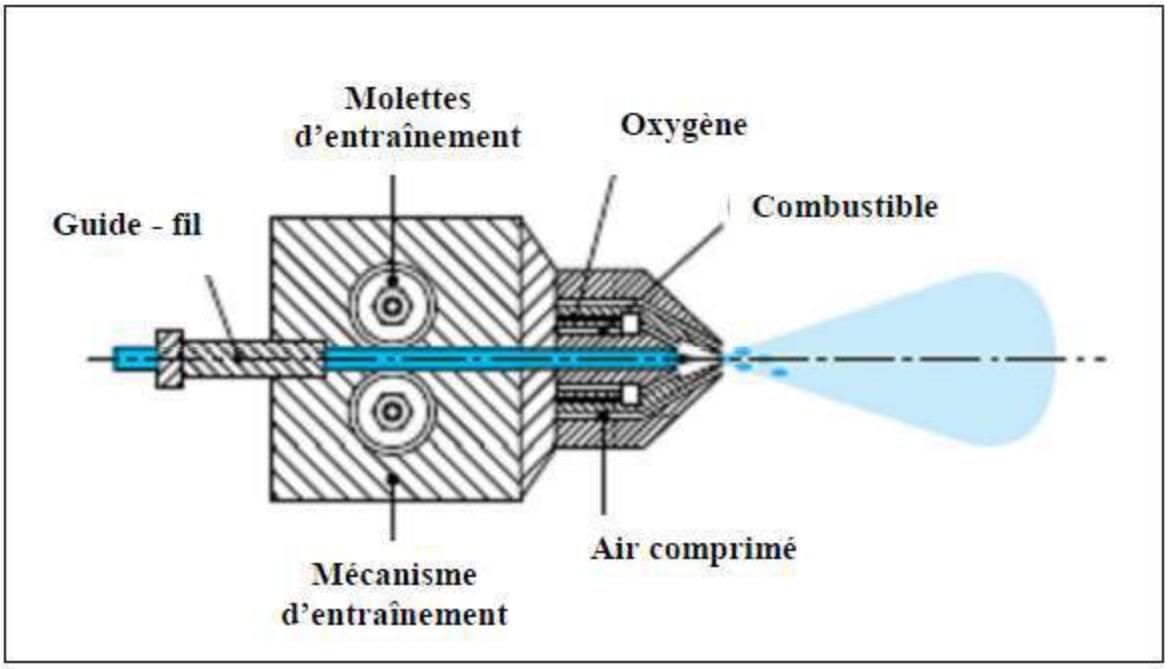


Figure I.5: Schéma d'un pistolet flamme fil [25]

I.5.1.3.La projection supersonique par combustion

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 m /s-1) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée (0,5 à 1 MPa) [26].

- **le procédé HVOF :** High Vélocité Oxo-fuel Flamme, il utilise la combustion à l'oxygène d'un carburant gazeux tel que : propane, propylène, tétère, méthane ou l'hydrogène ou liquide : généralement du kérosène.
- **le procédé HVAF** : High Vélocité Air-fuel Flamme, la combustion est assurée par un mélange kérosène-air comprimé [26].

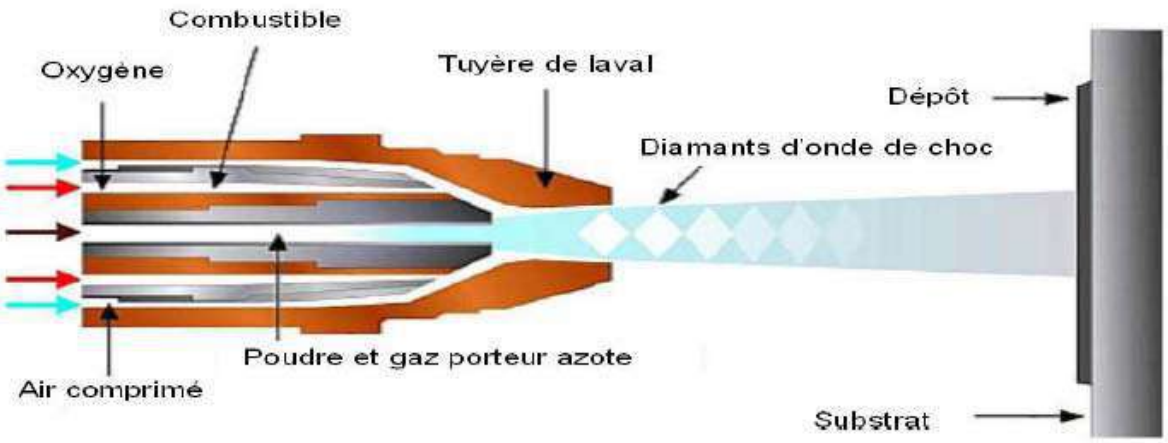


Figure I.6 : Schéma du procédé HVOV**.**

I.5.1.4.Le canon à détonation

Dans ce procédé le matériau d'apport, sous forme de poudre, est introduit dans un tube fermé à une extrémité appelé canon à détonation (fig. I.7), en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 6 à 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée est éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée et qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa. Le régime de projection est donc discontinu et entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Les dépôts réalisés avec ce procédé possèdent des caractéristiques remarquables telles que la porosité qui est inférieur à 1% et une adhérence qui est souvent supérieur à 80 MPa, à des taux horaires de dépôts de l'ordre de 3 à 5 kg/h [24,25].

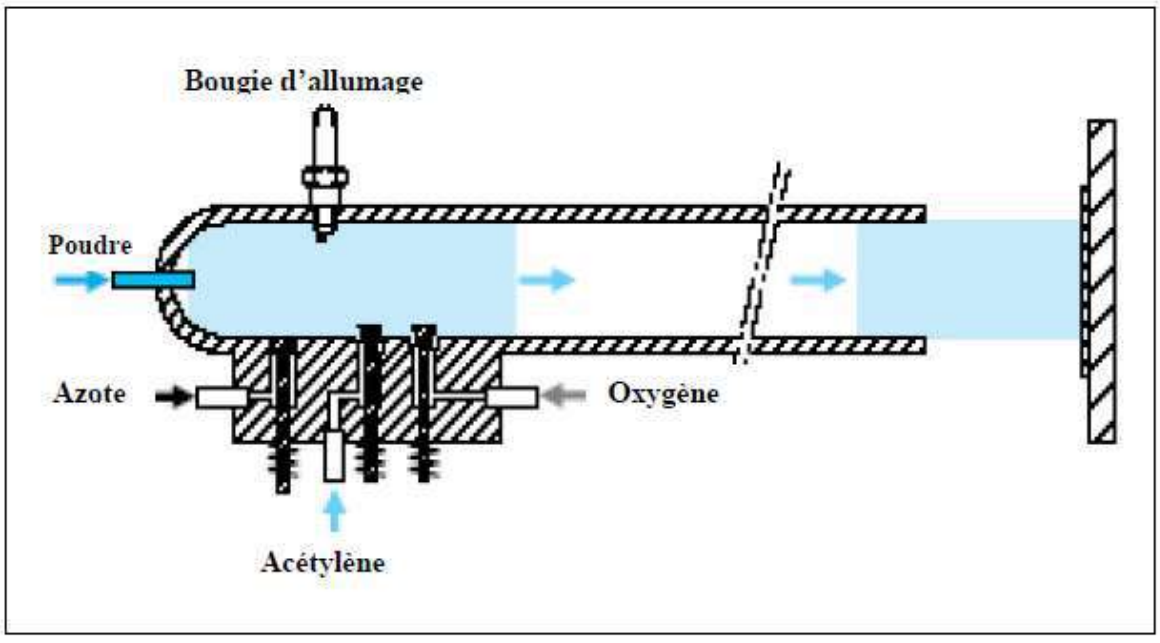


Figure I.7 *:* Schéma de fonctionnement du canon à détonation

I.5.2.La projection par arc électrique

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

I.5.2.1. La projection arc-fil

Le principe de cette technique consiste à amorcer un arc électrique entre deux électrodes consommables sous forme de fil. La tension appliquée entre ces deux fils varie entre 18 et 40 V pour des intensités de courant comprises entre 100 et 500 A. L'arc généré fait fondre l'extrémité des fils. Une circulation de gaz comprimé (généralement de l'air) permet d'atomiser la partie fondue des fils. La température de l'arc peut dépasser 6000 K dans l'air à pression ambiante, ce qui contribue à un chauffage excessif des particules et une vaporisation importante des gouttelettes. L'utilisation d'air comprimé comme gaz d'atomisation conduit également à l'oxydation des gouttelettes métalliques surchauffées.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts épais de 0,5 à 3 mm avec une adhérence de 20 à 40 MPa. Il permet de déposer des matériaux métalliques ductiles tels que le zinc, l'aluminium ou le cuivre mais également des superalliages non ductiles avec des qualités de dépôt comparables à ceux obtenues par projection plasma, ainsi que des dépôts métalliques renforcés par des particules céramiques non fondues grâce à la technologie des fils fourrés.

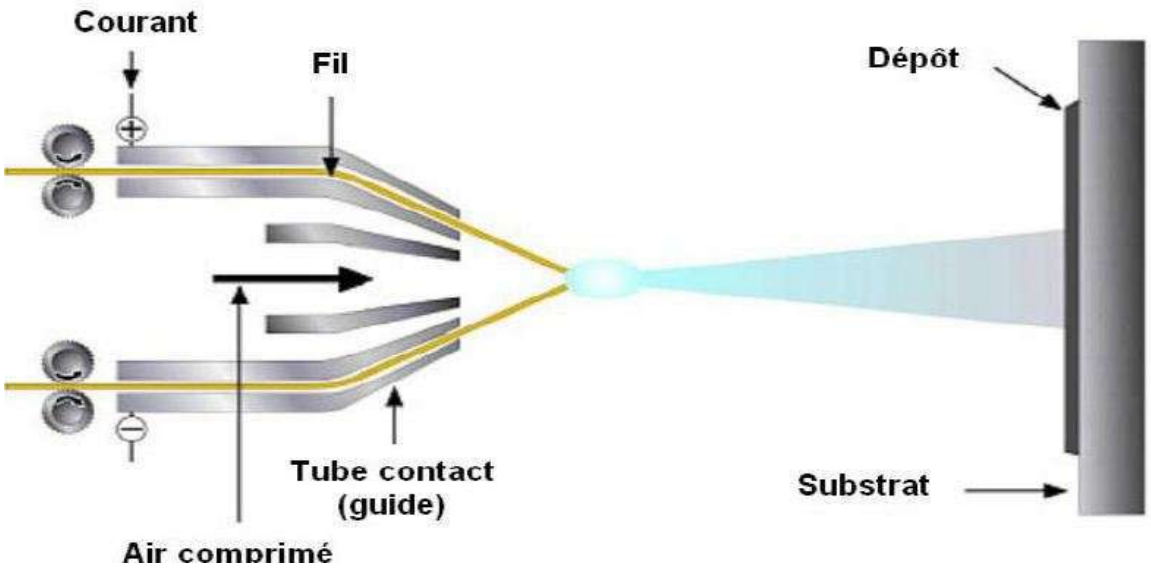


Figure I.8 : Schéma du procédé arc fil

I.5.2.2. La projection par plasma d'arc soufflé

Où cette fois-ci le matériau à projeter se présente sous la forme d'une poudre pulvérulente constituée de particules de tailles généralement comprises entre 10 à 100 µm de diamètre. D'autres techniques, comme celle dénommées SPS pour '' Suspension Plasma Spraying'' sont actuellement développées pour projeter des particules de taille nanométrique, pour l'obtention de revêtement finement structuré. La poudre est d'abord mélangée à un liquide pour former une suspension, puis injectée sous forme de grosses gouttes (~300 µm) dans le jet de plasma et ce pour lui permettre de pénétrer dans l'écoulement

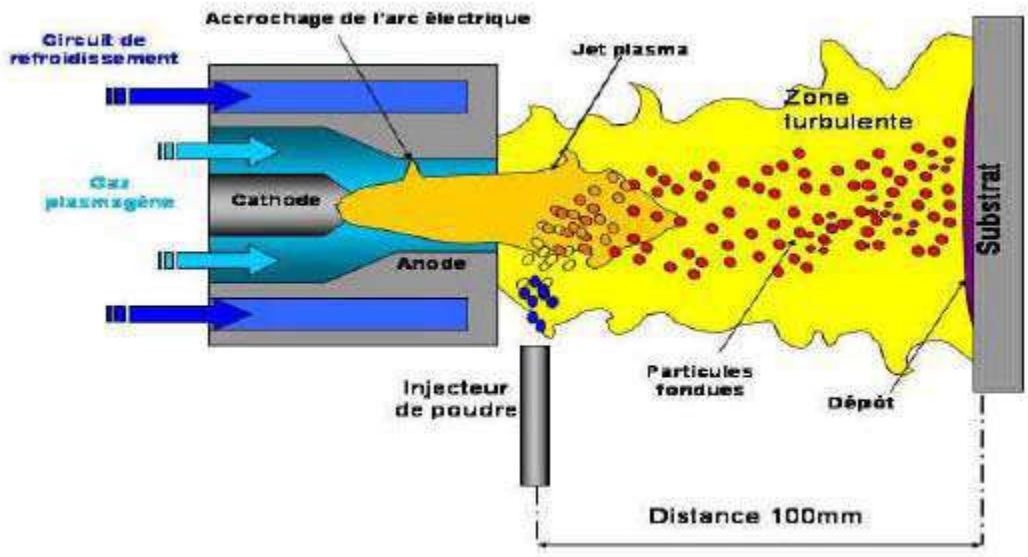


Figure I.9 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.

I.5.3.La projection plasma

Ce procédé utilise des matériaux métalliques, céramiques ou cermets sous forme de poudre avec des particules de taille inférieure à 100 µm. Ces particules sont déposées dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. La source de chaleur est un jet de plasma produit par arc électrique ou une décharge radiofréquence.

I.5.3.1.Fonctionnement de la torche à plasma d'arc

Les torches conventionnelles employées en projection plasma sont constituées d'une cathode en forme de tige et d'une anode concentrique qui constitue la tuyère. Le gaz plasmagène circule dans l'espace entre ces deux éléments. Deux familles de torche sont à distinguer [27].

❖ Torche à arc transféré

L'arc jaillit entre une électrode interne et un corps conducteur, généralement le substrat.

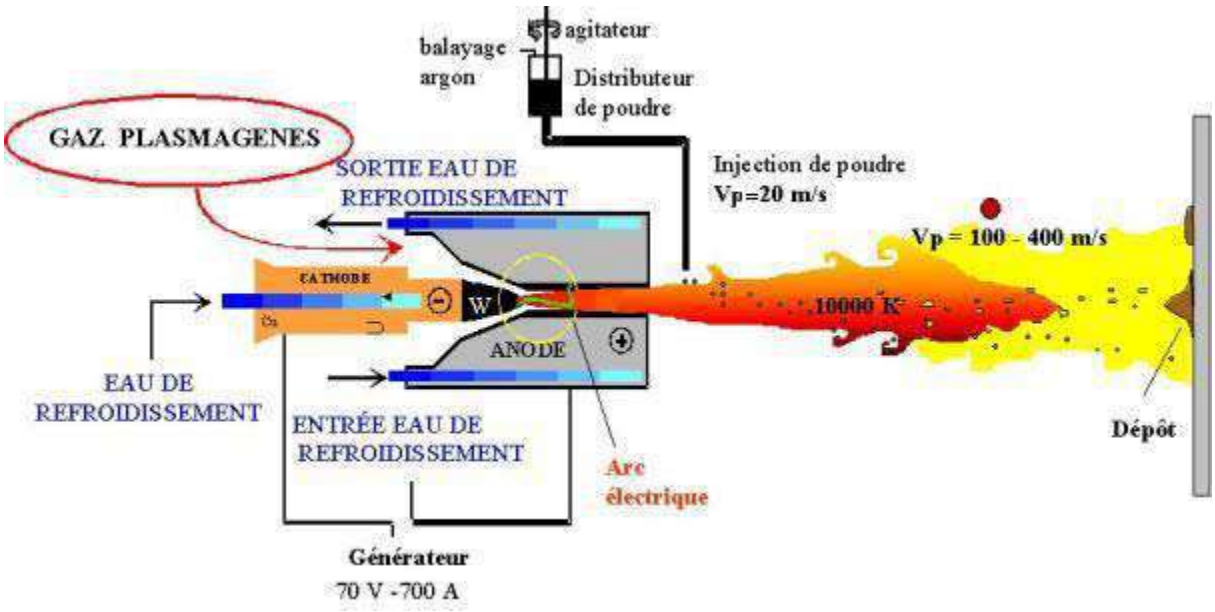


Figure I.10: Torche plasma à arc transféré

❖ Torche à arc soufflé

Dans la plupart des cas, la torche à plasma constituée d'une tuyère anode et d'une pointe cathode, fonctionne dans l'air à la pression atmosphérique. Ce procédé est appelé APS (Atmosphérique Plasma spraying). La différence de potentiel aux bornes de la cathode et de l'anode provoque l'éclatement d'un arc entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode. Cet arc est ensuite entretenu par le courant de forte intensité. La partie du gaz chauffée par effet Joule forme un volume de gaz ionisée ou plasma appelé colonne d'arc. Cette colonne d'arc quitte la torche en formant un dard (12) ou cœur du jet [28].

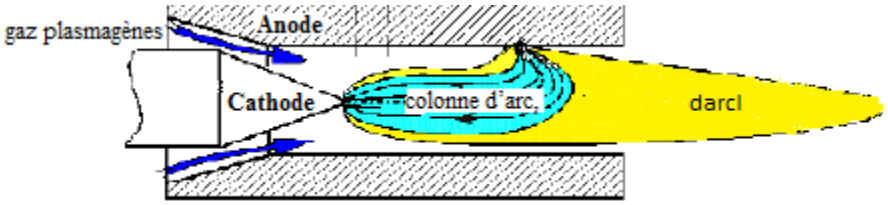


Figure I. 11 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma.

I.5.3.1.1.Amorçage de l'arc

L'amorçage de l'arc est assuré par une surtension, supérieure à une tension critique appelée 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).

I.5.3.1.2.Le gaz plasmagène

Le gaz plasmagène est généralement constitué de deux gaz, le premier est un gaz lourd qui donne sa quantité de mouvement aux particules injectées. Le choix est alors limité à l'argon (40 g/mole) ou à l'azote moléculaire (28 g/mole). Les torches utilisées (développée au laboratoire ou industrielle comme la PTF4 de Sulzer Metro) étant conçues pour travailler à l'argon comme gaz primaire nous ne considérerons que ce gaz. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent la tension « utile » qui va être disponible dans le jet de plasma est $\int_0^1 E(Z).dz$ où lest la longueur de la colonne d'arc. Le champ électrique dépend fortement des pertes de la colonne d'arc. Plus celles-ci augmentent plus l'arc se constricteur pour les limiter, accroissant par ce biais le champ électrique E. Les pertes latérales dépendent principalement d'une part du diamètre interne de la tuyère (plus il diminue plus elles augmentent, pour un courant donné) et d'autre part de la conductivité thermique du gaz plasmagène. Cette dernière est de loin la plus faible de toutes avec 'argon.

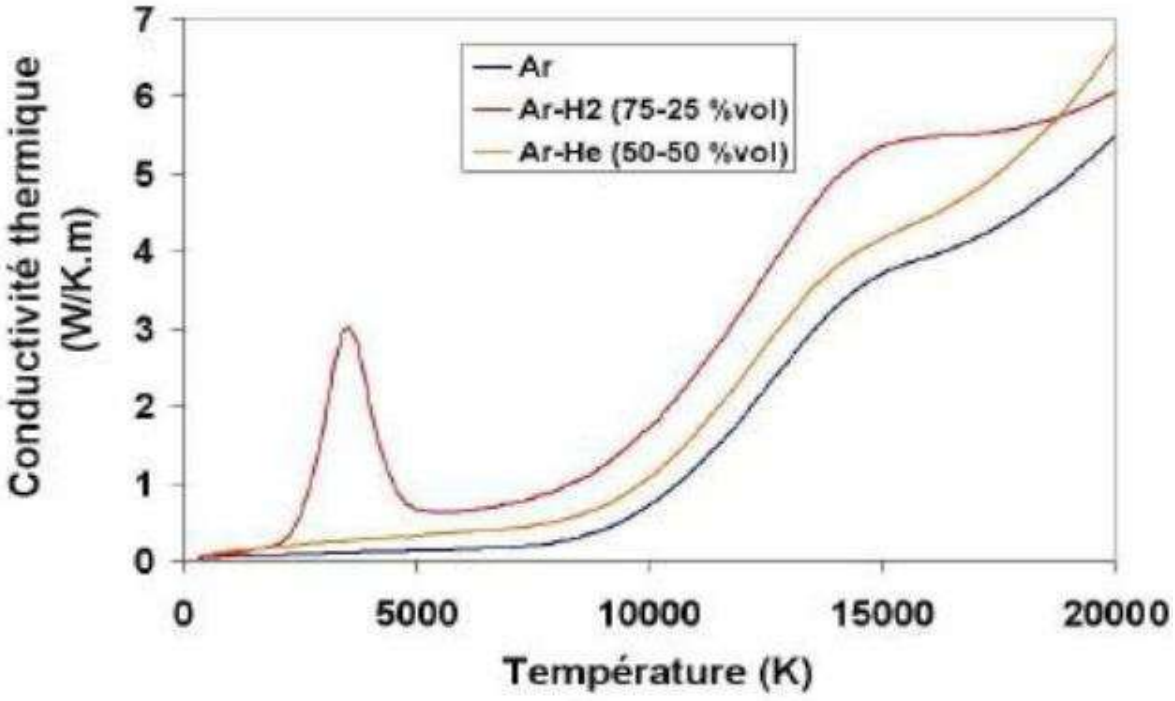


Figure I. 12 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes. [29]

Pour ce dernier, cela implique des champs dans la colonne d'arc de quelques centaines de V/m limitant ainsi la tension utile à 10-15 V pour une tuyère de 6 ou 7 mm de diamètre interne. C'est pourquoi on utilise des mélanges Ar-H2 ou Ar-He, chacun ayant des avantages et des inconvénients. La tension moyenne dans l'arc est alors, suivant les conditions de fonctionnement, d'une trentaine de volts pour Ar pur, une quarantaine de volts

Pour Ar-He et une bonne soixantaine pour Ar-H2. Cependant dans ce dernier cas, le courant est limité à environ 600-650 A car la constriction au niveau pied cathodique par l'hydrogène entraîne l'usure plus rapide de la cathode au-delà de ce courant. Par contre avec l'Ar ou l'Ar-He on peut atteindre 900 A voire 1000 A. De plus l'He accroît la viscosité du mélange au-delà de 10000 K (cf. Figure I.12) ce qui permet, pour des vitesses d'écoulement proches, d'obtenir des jets de plasma un peu plus larges et un peu plus longs avec ce mélange.

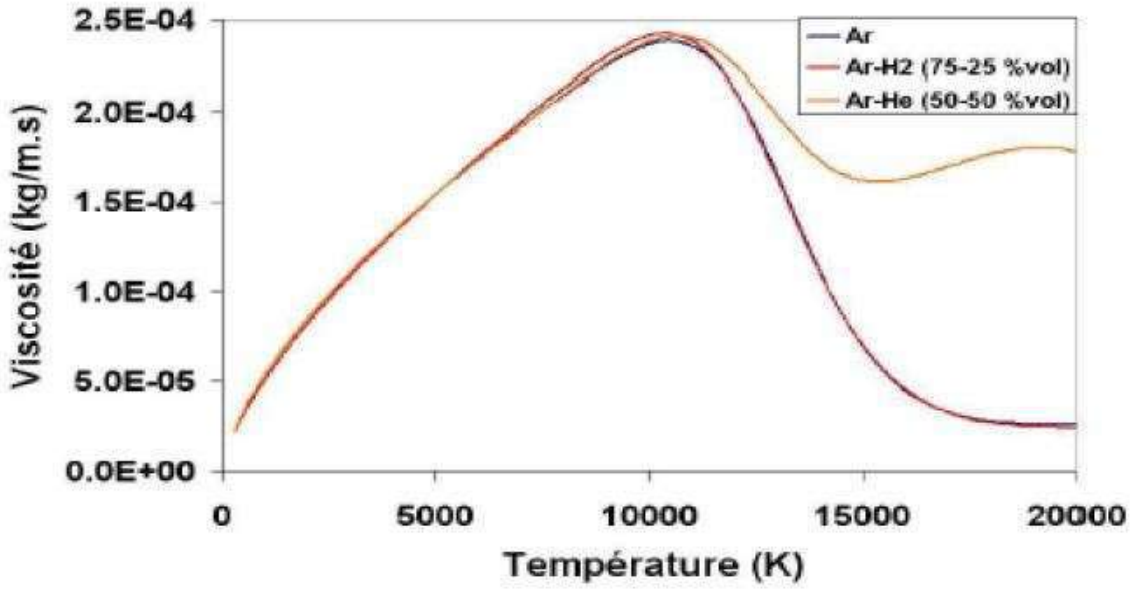


Figure I. 13 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. [29]

L'enthalpie, h, des gaz plasmagènes nous apporte également des informations intéressantes sur le comportement des jets de plasma. Rappelons que h est l'énergie dissipée dans le plasma divisée par le débit massique de gaz :$\frac{P-Q_{eau}}{\dot{m}}$(J/kg).

Comme nous pouvons le voir sur la (Figure I–13) elle est d'autant plus élevée pour une température donnée que l'on passe de l'argon pur, à l'Ar-He puis à l'Ar-H2. Mais ces courbes montrent également un point important : au-delà de 10000 K, l'augmentation du degré d'ionisation avec la température entraîne une variation importante d'enthalpie et pour accroître la température de 2000 K il faut pratiquement doubler l'enthalpie.

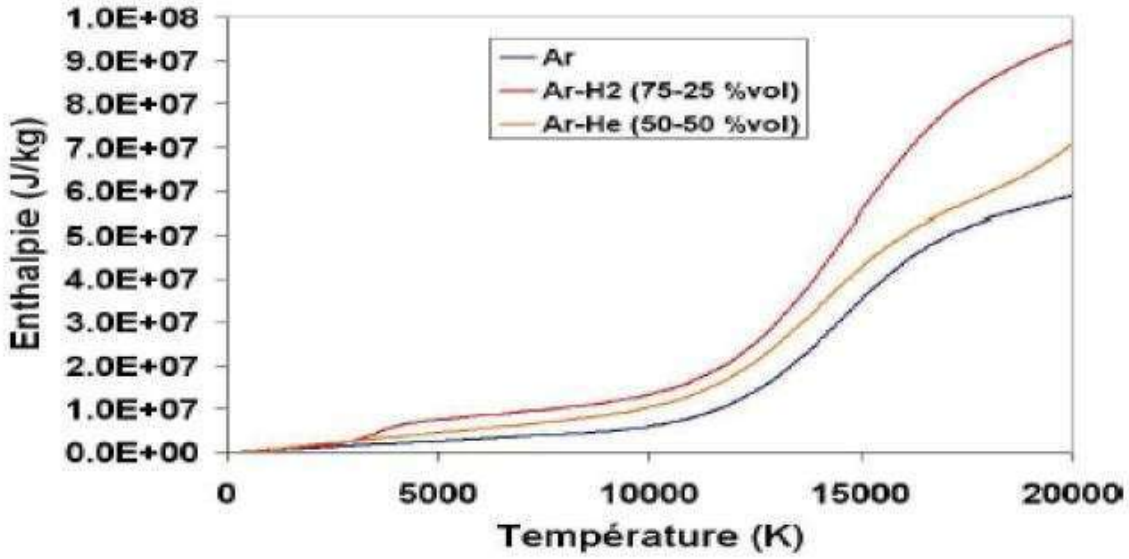


Figure I. 14 : Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. [29]

I.5.3.1.3.L'injection des gaz plasmagènes

Les électrons émis par la cathode sont accélérés par le champ électrique et créent le plasma dont la rapide expansion pompe une partie des gaz plasmagènes. L'injection des gaz plasmagènes peut être.

- **axiale** : parallèle à l'axe de la cathode,
- **radiale :** normale à l'axe de la cathode,
- **ou en vortex :** gaz injectés de manière radiale avec une composante de rotation.

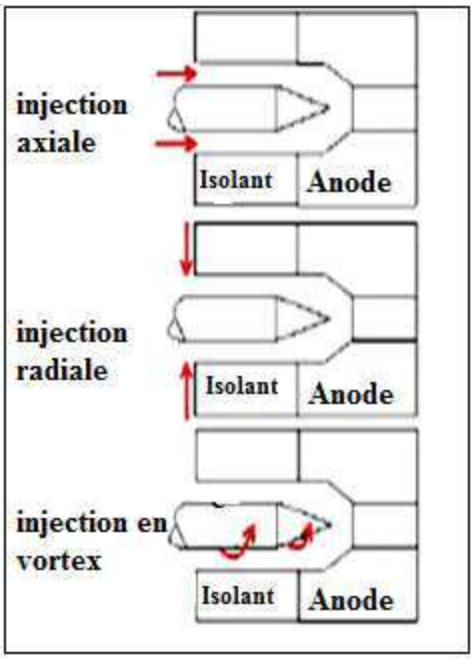


Figure I .15 : schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma

I.5.3.2.Formation du jet plasma

Dans une torche plasma à arc soufflé, l'arc électrique éclate entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode. L'énergie électrique est convertie en énergie thermique par effet Joule dans le gaz qui est ainsi chauffé et ionisé et forme alors un volume de plasma appelé colonne d'arc. Le courant électrique circule dans cette colonne, entre la pointe de la cathode et un point de l'anode appelé pied d'arc.

Une couche limite chaude de température supérieure à 6000 K se développe autour de la colonne d'arc tandis qu'une partie du gaz plasmagène, s'écoule le long de l'anode. Une couche limite froide (Figure I-16), gaine la colonne d'arc et assure sa stabilité.

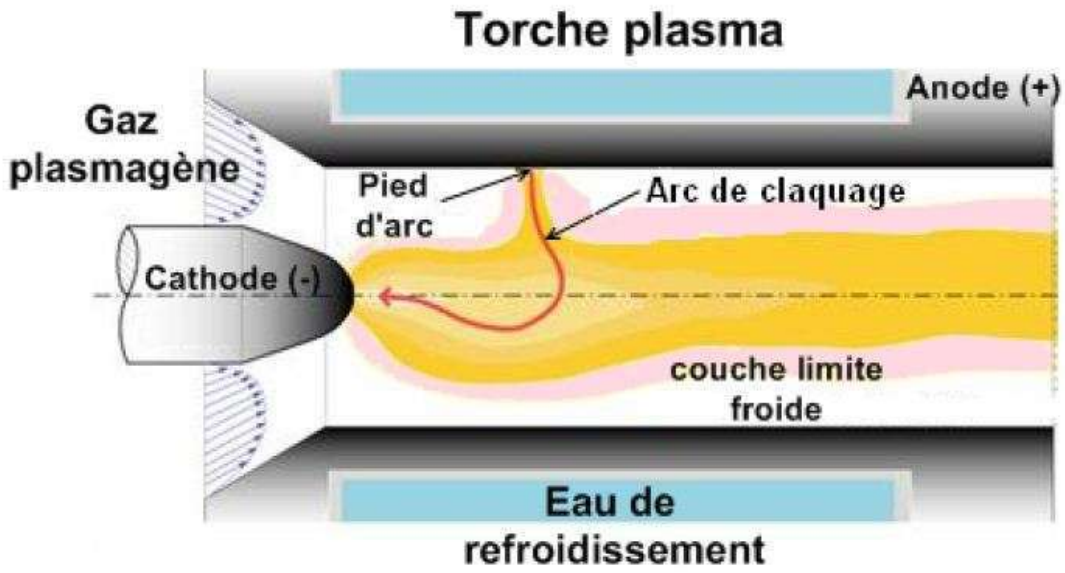


Figure I. 16 : Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma à courant continu

La boucle de plasma de connexion à l'anode, caractérisée par une température supérieure à la température d'ionisation (T > 8000 K) et sa faible densité massique (environ 1/30 de celle du gaz froid), est soumise à des forces dynamiques liées à l'écoulement gazeux et aux forces électromagnétiques de Laplace (souvent dites de Lorentz) dues à l'interaction entre le courant d'arc et son champ magnétique (figure)

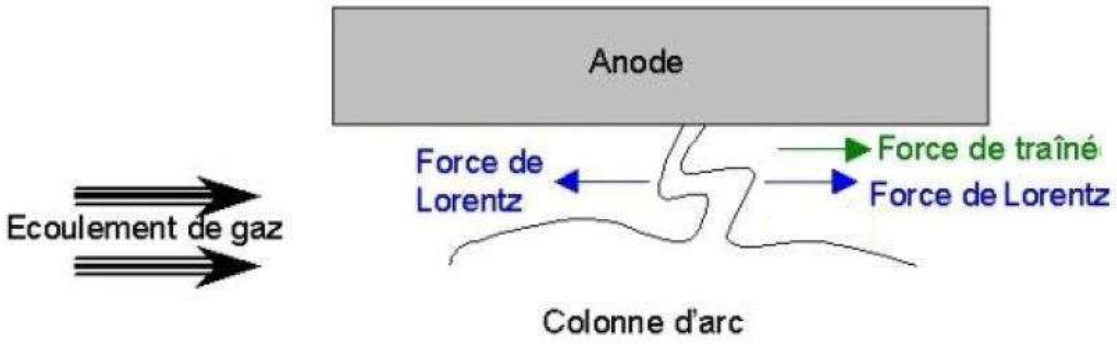


Figure I.17 : Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc

I.5.3.3.Ecoulement du jet plasma

La Figure I-18 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) 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 (zone4).

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 10-3s et 10-4s, 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.
- Entre 10-1s 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 [30]

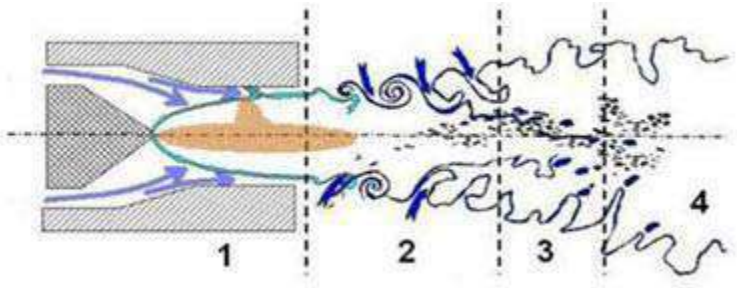


Figure I.18 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant.

- **1** : Ecoulement laminaire
- **2** : Début de développement de turbulence
- **3 :** Ecoulement cisaillé turbulent
- **4** : Ecoulement pleinement développé

I.6.Traitement des particules dans le jet plasma

Le traitement des particules dans le jet plasma met en jeu l'ensemble des transferts de quantité de mouvement, de masse et de chaleur entre le plasma et les particules. Ces transferts sont fonction des paramètres du plasma (champs de température et de vitesse de l'écoulement, mélange plasmagène, …) et des paramètres des particules ou particules (propriétés thermiques, distribution de taille, morphologie, …) [31].

I.6.1.Injection de la poudre

Les poudres céramiques avec leur faible conductivité thermique (K< 10 W/m. K pour la majorité) et leur point de fusion élevé (> 2300 K) sont injectées dans les zones chaudes et rapides du jet de plasma pour subir un traitement thermocinétique optimal soit en sortie de la torche (injection externe) soit à l'intérieur de la tuyère (injection interne). Pour pénétrer et être entraînées dans le jet de plasma, les particules doivent être animées d'une quantité de Mouvement suffisamment élevée pour atteindre le cœur du jet de plasma. Pour ce faire, les particules sont accélérées à l'aide d'un gaz porteur lourd (Ar, N2) puis injectées à travers un injecteur métallique.

On deux type de l'injection de la poudre (axial, radiale) :

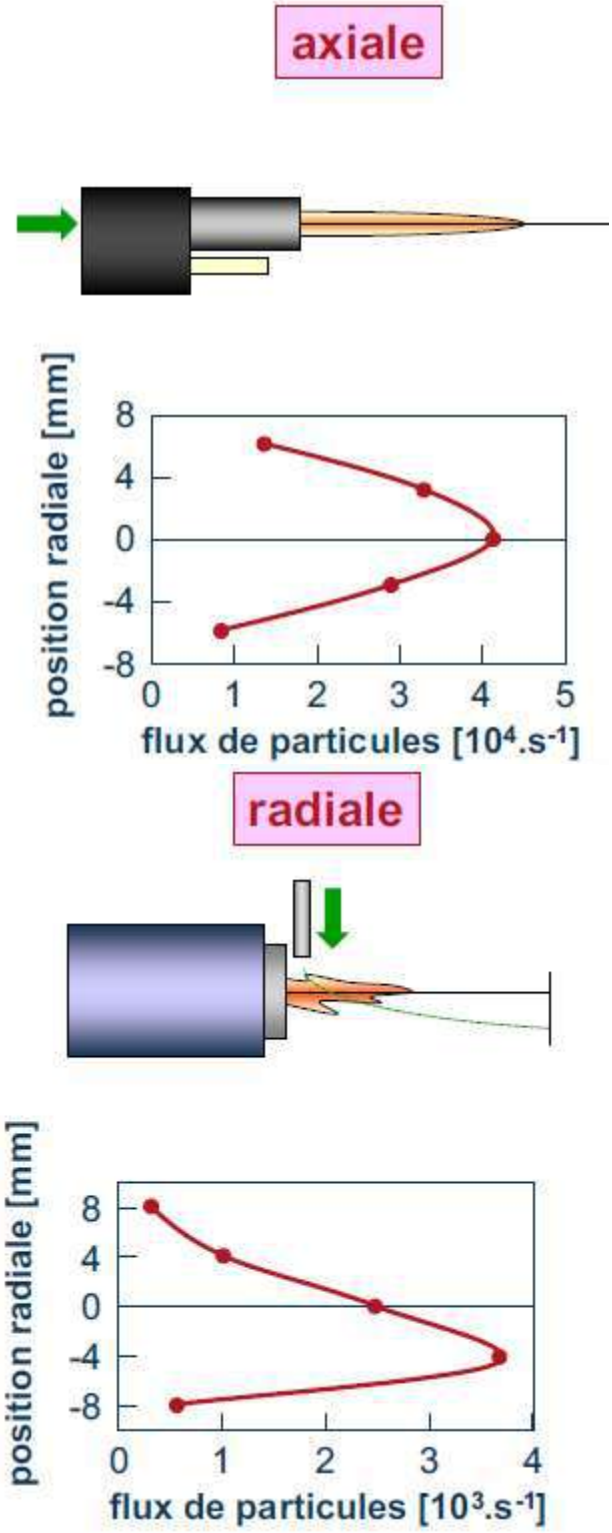


Figure I.19 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)

I.7. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat

Les particules, chauffées et accélérées dans l'écoulement plasma, s'écrasent sur le substrat où leur énergie cinétique est transformée en travail de déformation visqueuse puis en énergie de surface. Les particules forment ainsi des lamelles aussi appelées « splats ». Trois phases qui prennent place en quelques µs peuvent être distinguées dans la formation d'une lamelle :

- L'impact de la particule sur le substrat.
- Son étalement.
- Son refroidissement et sa solidification.

Les deux dernières phases n'étant pas forcément séquentielles, la solidification pouvant intervenir avant la fin de l'étalement.

La lamelle est la brique élémentaire constituant la couche. Sa morphologie et ses propriétés conditionnent la microstructure du dépôt et ses propriétés. L'analyse des phénomènes à l'impact permet de corréler les paramètres de projection à la microstructure du revêtement [32].

I.7.1. Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat

Lors de son impact, la particule peut rebondir ou s'étaler avec ou sans éjection de matière. En effet, au contact avec le substrat, la particule se retrouve brusquement décélérée.

L'augmentation de pression à l'interface entraîne la propagation d'une onde de pression à l'intérieur du matériau liquide qui peut provoquer son éjection partielle. Mundo et al. (1995) [33] ont déterminé un critère K, dit critère de Sommerfeld, reliant le comportement de la particule à l'impact aux nombres de Reynolds et de Weber. Ce critère est défini par l'équation (I.1)

$$\mathbf{K}=\boldsymbol{We}^{\mathbf{0.5}}.\boldsymbol{Re}^{\mathbf{0.5}} \qquad \text{(I-1)}$$

Ou :

w_e Est le nombre de Waber (équation I.2)

R_e Est le nombre de Reynolds (équation I.3)

$$\mathbf{W_e}=\frac{\boldsymbol{\rho}.\boldsymbol{d}.\boldsymbol{v}^2}{\boldsymbol{\sigma}} \qquad \text{(I-2)}$$

$$R_e = \frac{\rho.d.v}{\mu} \quad \text{(I-3)}$$

Ou:

ρ: Est la masse vomumique de la particule ($kg.m^{-3}$)

V : sa vitesse (ms^{-})

d : son diamètre(m)

σ : La tension de surface liquide – vapeur du matériau ($J.m^{-3}$)

μ : sa viscosité ($kg\ .m.s^{-2}$)

Si K est inférieur à 3 il y a rebond de la particule, si K est compris entre 3et 57,7 il y a étalement sans éjection de matière et pour K supérieur à 57,7 il y a « splashing » (figure I-11)

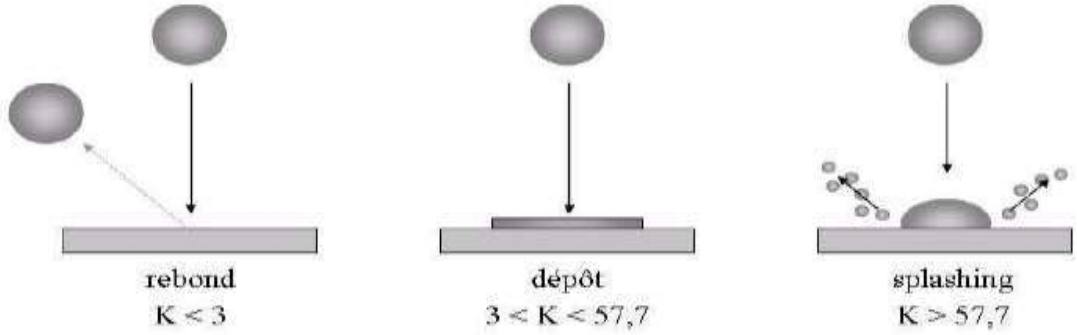


Figure I .20 : Modes d'impact [34].

Les éclaboussures présentes dans le troisième mode apparaissent quelques dizaines de nanosecondes après l'impact et sont dues à la propagation de l'onde de pression [35].

I.7.2. Etalement de la particule

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 (figure I.21). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement [36, 37].

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* est supérieur à 70 et parfois quand $10<K<70$ [38]. Cet éclaboussement croît en fonction de *K* et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3mm,

c'est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène.

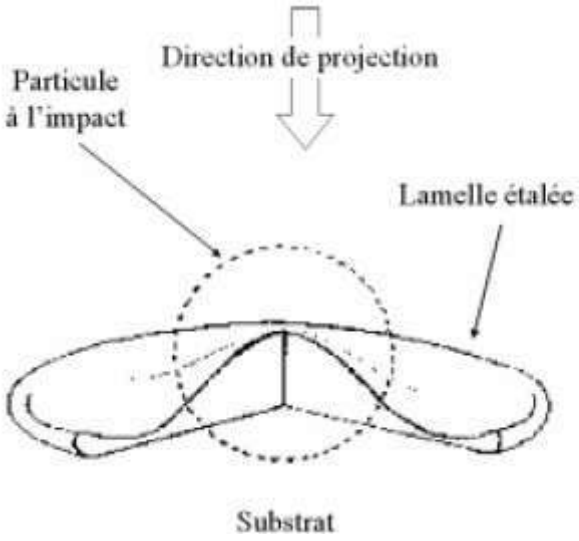


Figure I.21 : Schéma d'écrasement de la particule [39].

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 (le diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l'état physico-chimique etc.…) et l'état de la surface du substrat où les particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques, l'oxydation etc.…) [39].

Plusieurs études expérimentales ont été effectuées (98% sur les surfaces lisses) pour comprendre l'influence des propriétés des particules à l'impact sur leur écrasement et la formation des spalts [40]. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température [41], de la rugosité [42] et des propriétés thermiques du substrat [43] sur l'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué [44]. Il faut noter que la mouillabilité dépend de la rugosité et de la porosité du substrat ainsi que de la composition chimique et de l'état cristallin des particules et du substrat. Madjeski (1976) [45] a défini le degré d'étalement ξ comme le rapport entre le diamètre de la particule étalée D et le diamètre d de la particule avant l'impact (équation I- 4)

$$\boldsymbol{\varepsilon = \frac{D}{d}} \qquad \text{(I-4)}$$

A partir de l'équation (I-4) et en négligeant les phénomènes de tension de surface, ce rapport peut être relié aux propriétés de la particule liquide à l'impact par l'intermédiaire du nombre de Reynolds suivant l'équation (I-5) :

$$\varepsilon = 1{,}29.\ R_e^{0.2} \qquad \text{(I-5)}$$

Des études numériques de la simulation d'impact de gouttes sur un substrat et des études expérimentales ont conduit également à une équation du même type (I.6) [46].

$$\varepsilon = A.R_e^{b} \qquad \text{(I-6)}$$

Où :

A et **b** sont des constantes variant, respectivement de 0,8 à 1,2941, et de 0,125 à 0,2 selon les auteurs.

I.7.3.La solidification des lamelles

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle-substrat varie Avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène

I.7.3.1.Impact et formation du dépôt

En projection plasma, les dépôts sont formés de couches successives de lamelles écrasées qui se chevauchent.

Les conditions opératoires déterminent la microstructure et les propriétés du dépôt formé dont la cohésion et la tenue sont assurées par les contacts inter-lamellaires et lamelle-substrat.

Plusieurs travaux expérimentaux et de modélisation ont été dédiés à une meilleure compréhension des phénomènes d'impact et de solidification d'une particule fondue totalement ou partiellement sur une surface.

Ces études montrent que le phénomène d'étalement est contrôlé par les paramètres de la particule (état de fusion, température, vitesse, oxydation, …) et les paramètres substrat (température, rugosité, état d'oxydation …). Lorsqu'une particule fondue entre en contact avec le substrat, son énergie cinétique est dissipée sous l'effet des forces de viscosité et de

tension de surface, elle forme alors une lamelle. La phase d'étalement peut être perturbée par la solidification et sur les aspérités de la surface du substrat. Cette phase du processus régit la qualité finale du dépôt (propriétés thermomécaniques) et la formation plus ou moins importante de porosité.

Les travaux de Madejski [47] sont cités dans presque tous les articles traitant de ce problème. Le premier, il a étudié le degré d'aplatissement et l'étalement de la gouttelette sur une surface, en se fondant sur un bilan d'énergie et en tenant compte des effets de la solidification, les équations finales ayant été résolues numériquement. Toutefois, il a supposé que la vitesse de solidification était suffisamment faible par rapport à la vitesse d'impact pour découpler les deux phénomènes.

Les travaux de Kudinov et al. [48] aboutissent à un classement qualitatif d'une trentaine de morphologies différentes de particules d'alumine étalées en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact sur une surface lisse .Une gouttelette totalement fondue s'étalerait correctement avec une vitesse faible (cas 1) et éclaterait au moment de l'impact sous l'action des forces de surface avec une vitesse élevée (cas 6). Ce phénomène étant appelé éclaboussure à l'étalement ou suivant l'appellation anglo-saxonne utilisée par la suite « flattening splashing ». Dans le cas d'une particule partiellement fondue, le noyau solide resterait piégé au centre de la lamelle (cas 30) ou serait éjecté conduisant à une lamelle de forme annulaire (cas 17). Cependant, les paramètres du substrat n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

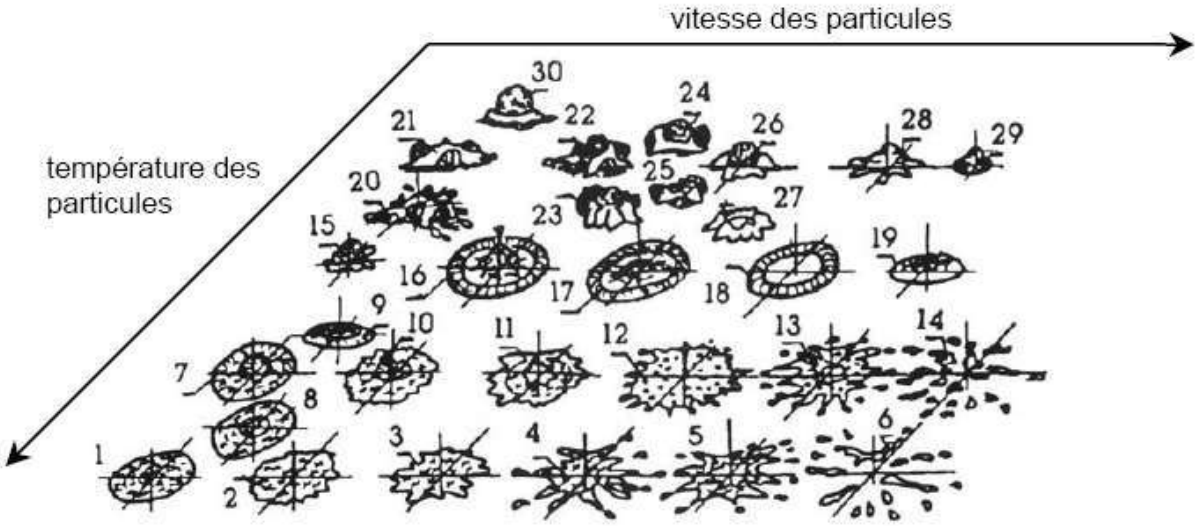


Figure I.22 : Influence de vitesse et température des particules d'alumine projetées par plasma avant impact sur la morphologie des lamelles

D'autres études montrent que le comportement des particules immédiatement après l'impact (quelques nanosecondes) peut être caractérisé par le facteur de Sommerfeld K, exprimé par :

$$K = We^{0,5}.Re_P^{0,25}$$

Où Re est le nombre de Reynolds de la particule,

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{pd_p}v_p^2}{\sigma_p}$$

σ_p Étant la tension de surface liquide vapeur (J.m-2) Ecure et al. Ont étudié l'impact des particules fondues d'alumine sur des substrats pour différentes températures et rugosités.

Ils montrent que l'étalement est moins bon sur une surface froide que sur une surface chaude et qu'une rugosité importante peut favoriser le flattening splashing. Cependant, quelle que soit la température de la cible, le phénomène de splashing à l'impact est observé systématiquement pour des valeurs du nombre de Sommerfeld supérieures à une valeur critique $30 < Kc < 60$. Ce qui est à comparer aux impacts de gouttelettes d'eau pour lesquels la valeur critique est Kc =58. Cedelle [49] a utilisé deux dispositifs expérimentaux différents pour étudier le comportement à l'impact d'une particule projetée par plasma. Le premier permet la génération d'une goutte millimétrique calibrée par plasma inductif et l'acquisition de la température de surface du substrat puis de la goutte lors de son impact. Le deuxième permet d'étudier l'impact d'une particule de quelques dizaines de micromètres projetée par plasma d'arc. Il est constitué d'un pyromètre bi chromatique et deux caméras rapides.

Il permet de visualiser des phénomènes d'étalement perpendiculairement et parallèlement au substrat à des échelles de temps de l'ordre de la microseconde et des échelles d'espace de l'ordre de la centaine de micromètres. Il a été montré que le préchauffage d'un substrat au-delà d'une température appelé température de transition Tt engendrait la formation de pics d'oxydes à l'échelle nanométrique en surface de l'acier inoxydable 304L. Ceci est illustré par la microscopie à force atomique (AFM), où les pics sont caractérisés par un coefficient de dissymétrie (« Skewness ») positif. Ces pics augmentent considérablement le nombre de points de contact entre chaque lamelle et le substrat. Ce qui a pour effet d'accroître la mouillabilité du substrat lorsque la température de ce dernier est supérieure à Tt et d'éliminer les adsorbats et les condensats en surface. La résistance thermique entre lamelle et substrat est alors diminuée de plus d'un ordre de grandeur. Ce qui favorise la formation de lamelles circulaires sur substrat lisse, contrairement au cas où le substrat est maintenu à température ambiante ce qui entraîne la formation de lamelles déchiquetées. De même, les vitesses de

trempe de lamelles millimétriques de nickel produites par l'impact de gouttes millimétriques ont été mesurées en fonction de la température de préchauffage du substrat. Les lamelles déchiquetées, étalées sur substrat froid (température ambiante) présentent des vitesses de refroidissement relativement faibles (de l'ordre de 104 $K.s^{-1}$). Sur un substrat chaud (température supérieure à Tt), les lamelles circulaires, de forme régulière ont, quant à elles, des vitesses de refroidissement beaucoup plus élevées (5.104 à 7,5.104K.s-1). Le contact thermique est donc aussi amélioré lorsque Tt > T.

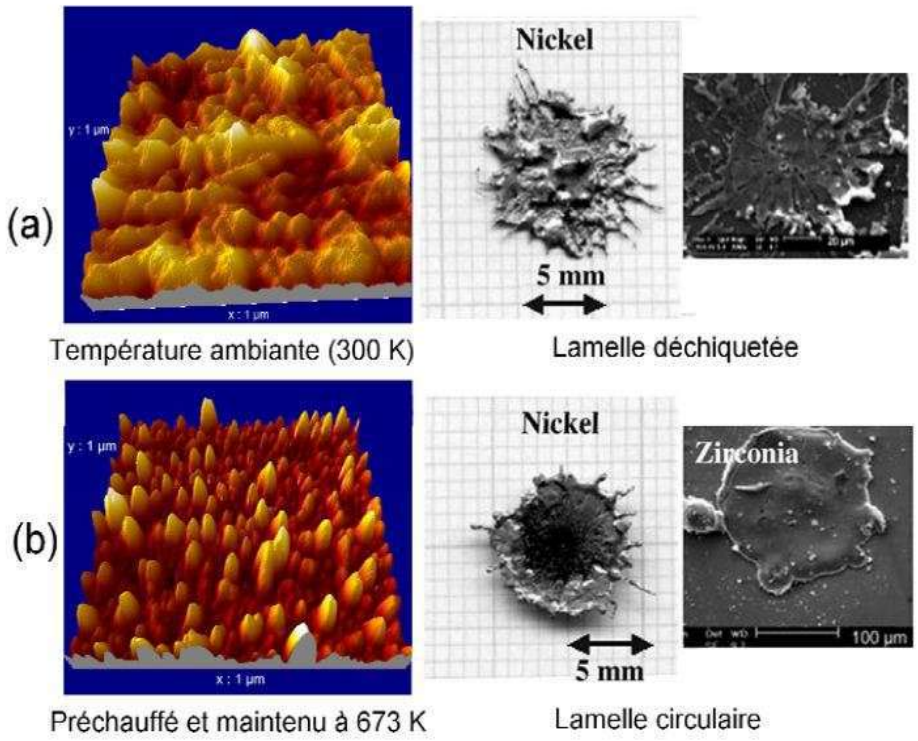


Figure I .23 : Morphologies de lamelles obtenues sur un substrat en acier

I.8. Caractéristiques microstructurales des revêtements

Les revêtements élaborés par projection thermique sont constitués d'un empilement successif de lamelles plus ou moins fondues. A chaque passage de la pièce à revêtir devant des particules sont déposées. Comme la distribution de ces dernières au sein de l'écoulement est gaussienne, le cordon de projection présente également un profil gaussien ; ses caractéristiques géométriques dépendent du mouvement relatif torche/substrat (paramètres cinématiques) et du débit de poudre injectée.

Ce mouvement inclut généralement un décalage de la torche, entre chaque passage de la pièce devant la torche il définit le « pas de projection» qui conditionne le recouvrement des

cordons. Il est nécessaire de contrôler ce recouvrement afin de contrôler le flux thermique apporté à la couche sous- jacente. Bernard et al. (1990) ont préconisé pour la projection de matériaux céramiques un taux de recouvrement de 50% et une épaisseur par passe maximale de 10 μm [50].

Le revêtement présente une structure lamellaire anisotrope et hétérogène résultant de la disparité de l'état thermocinétique des particules à l'impact, de leurs modes d'étalement et de solidification. Des contraintes au sein de la couche provoquent également l'apparition de fissures .Cette structure présente des pores qui jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques et thermiques de la couche. Ces pores peuvent être classifiés en trois catégories [51, 52, 53] :

- Les pores globulaires, dus principalement à des défauts de remplissage ou la présence de particules infondées.
- Les pores ou fissures inter-lamellaires, dues principalement à une mauvaise qualité de contact entre les lamelles.
- Les fissures intra-lamellaires, dues principalement aux contraintes dans la couche.

I.9. Substrat

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 importante, car il est en effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas à son substrat [53, 54].

I.9.1. Préparation de substrat

Les techniques de préparations 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 [55, 56] :

- un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passavants 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 ≫ qui permet la création d'un état de surface rugueux. Apres le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité

sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir 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 écrasés, notamment pour les contraintes parallèles au substrat qui tendent à 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 à 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 de graisse (introduite par exemple par l'air de sablage).

I.9.2. Phénomènes d'oxydation

L'inclusion d'oxydes dans les dépôts tend généralement a dégrader leurs propriétés : ils présentent des lamelles moins fortement liées, une composition chimique hétérogène et des contraintes internes résultant de la différence de coefficient de dilatation thermique entre oxydes et métaux. Les phénomènes d'oxydation peuvent intervenir à différents stades du procédé :

- oxydation des gouttelettes métalliques chauffées en vol.
- oxydation pendant la phase de formation des lamelles sur le substrat.
- oxydation de la surface du dépôt lors de son refroidissement.

Ce dernier mécanisme est généralement négligeable compte tenu de la température atteinte par le substrat (100-200°C).

I.9.2.1. Oxydation des gouttelettes en vol

L'importance de l'oxydation des gouttelettes en vol dépend [57, 58] :

- de la nature du matériau projeté,
- de la température des gouttelettes,
- du temps de séjour des particules en vol, donc de leur vitesse et de la distance de tir,
- de la quantité d'oxygène présente au voisinage des gouttelettes,
- de la cinétique des réactions d'oxydation,
- des mécanismes de diffusion de l'oxygéné vers le cœur des particules. La quantité d'oxygéné présente dans le jet provient du gaz d'atomisation s'il s'agit d'un gaz

oxydant comme l'air, mais aussi de l'entrainement de l'air ambiant a la sortie de la tuyère.

L'oxydation des particules en vol peut être due a deux mécanismes :

1. La diffusion de l'oxygéné dans les gouttelettes fondues.

2. Les mouvements de convection induits au sein de la gouttelette liquide par l'écoulement du gaz d'atomisation (figure I.24).

Ces mouvements entrainent de l'oxygéné et des oxydes vers le centre de la gouttelette, et amènent du métal ≪ frais ≫ en surface qui peut alors s'oxyder. De tels mouvements se produisent pour des différences de viscosité cinématique entre le gaz et la particule

Importantes (gaz particule >50) et pour un nombre de Reynolds de la particule supérieur à 20. Ce phénomène est donc favorise par des vitesses de gaz d'atomisation élevées [59, 60,61]

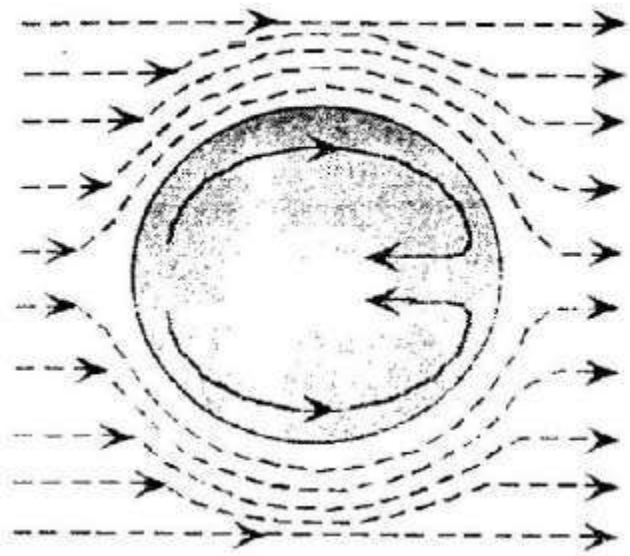


Figure I.24 : Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette [58].

L'oxydation en vol peut être donc relativement importante et ne doit pas être sous-estimée.

I.9.2.2. Oxydation lors de la formation du dépôt

Il est possible de distinguer 2 types d'oxydation [60] :

1. L'oxydation des lamelles : elle est généralement peu importante car les lamelles ne sont soumises a l'air ambiant que pendant quelques microsecondes, avant qu'elles ne soient recouvertes par d'autres lamelles.

2. L'oxydation entre deux passes successives : elle peut être non négligeable puisqu'il peut s'écouler quelques secondes a quelques heures entre deux passes successives suivant la taille de la pièce et la vitesse pistolet-substrat. L'étape militante est la diffusion de l'oxygène a travers la couche d'oxyde en surface. Elle dépend en grande partie de la température du

couple dépôt /substrat pendant et après le tir. Cependant, ce type d'oxydation est limite en projection arc-fil car la température du substrat dépasse rarement les 200 °C.

I.10. Caractéristiques du dépôt

Le dépôt obtenu est forme par le mécanisme d'adhésion inter-particule-substra.Il est en général le résultat de plusieurs mécanismes de liaisons opérant simultanément. Ce qui donne une structure lamellaire. L'écrasement d'une nouvelle particule sur celle précédemment déposée intervient toute les 10^{-2} a 10^{-1}s alors que la solidification de la lamelle dure au plus 10^{-5}s.

Le contact entre lamelles et /ou entre les lamelles et le substrat va en grande partie conditionner les propriétés thermiques et mécaniques des dépôts. L'accrochage d'une particule sur celle précédemment dépose et /ou sur le substrat est réalise par différant mécanique [62 ,56] :

- L'accrochage mécanique : c'est le mécanisme le plus important pour les dépôts céramiques ce type d'accrochage est très améliore par le sablage préalable des substrats.

Les lamelles suivent les contours des Aspérités et les serrent en se contractant au refroidissement.

- **l'adhésion chimique :** ce type d'adhésion est observe dans le cas ou le substrat et le matériau projeté présentent une affinité chimique avec la formation d'un alliage ou d'un compose intermétallique
- **l'adhésion physique :** contrôlée par le phénomène di fusionnel .que a lieu lorsque le substrat est maintenu a température élevée, comme lors de la projection sou vide

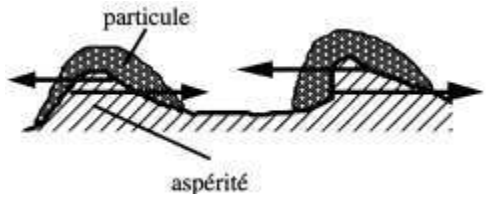


Figure I.25 : écrasement de particules sur des aspérités**.**

Âpres écrasement, l'énergie thermique contenue dans la particule est extraite par le substrat, d'ou un refroidissement très rapide des particules de l'ordre de a 106k/s, ce refroidissement brutal induit des taille de grains très fins (moins de 1 m) favorables aux propriétés mécaniques, mais provoque l'apparition de phase métastables, voir vitreuse, par exemple pour l'alumine, il y a l'apparition de la phase y [62] Figure(I.26).

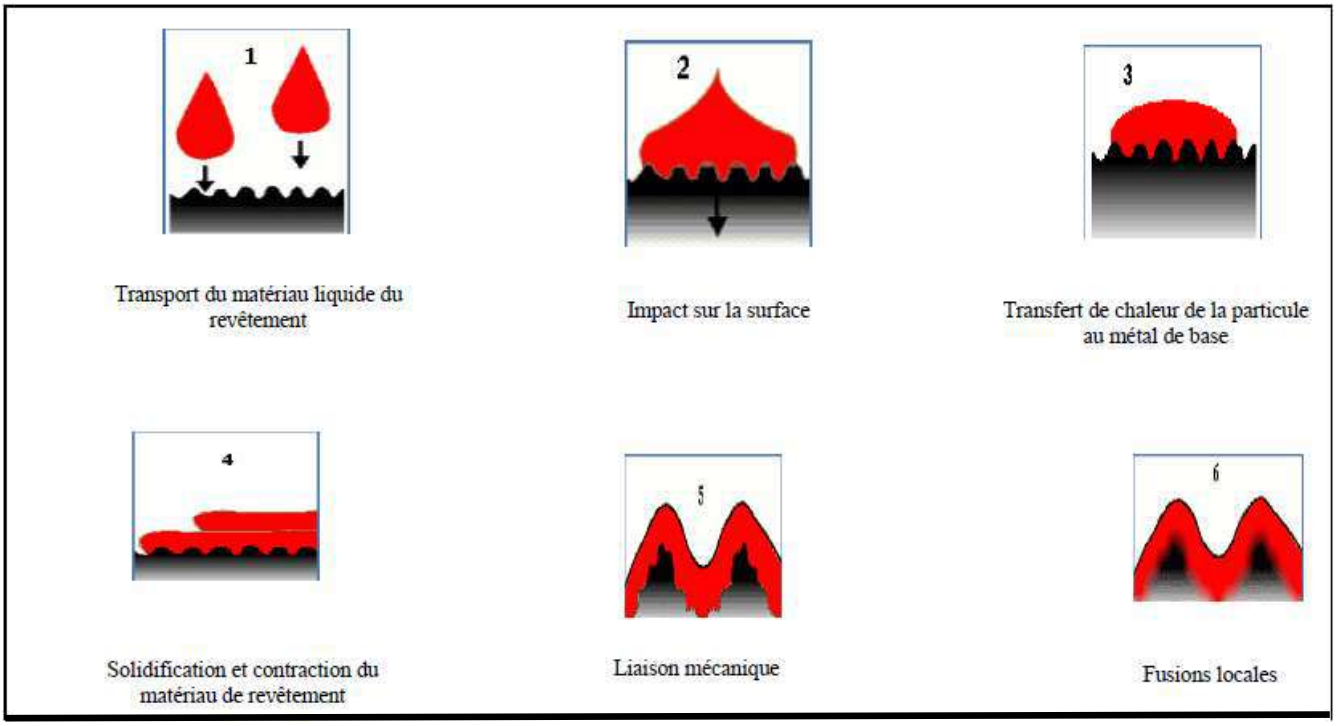


Figure I.26 : processus du dépôt.

I.10.1. Microstructure

Les particules fondues s'écrasent sur le substrat ou des particules sont déjà déposées et forment de fines lamelles qui s'adaptent aux irrégularités de la surface. Le temps de solidification d'une particule projetée est de l'ordre de la microseconde a la dizaine de microsecondes [61, 63].

Les caractéristiques de la microstructure dépendent, d'une part, des paramètres des particules a l'impact (vitesse, taille, état de fusion et état chimique) et d'autre part, des paramètres du substrat (matière, rugosité, état chimique de la surface et température) [64, 65].

I.10.2. Teneur en oxydes et porosité

Fondamentalement, trois paramètres principaux, la vitesse, la température et la taille de particules, influencent la porosité et la teneur en oxydes des dépôts. La fraction d'oxydes dans le dépôt est inversement proportionnelle au diamètre et à la vitesse de particules et directement proportionnelle à la température de surface des particules [65, 66].

L'augmentation de la température des particules se traduit par une diminution de leur viscosité et la rugosité du dépôt est réduite.

On peut distinguer trois types de porosités : la première est la porosité fermée avec des pores entièrement inclus dans le dépôt, la seconde est la porosité ouverte avec des pores qui présentent une extrémité fermée et une autre ouverte au niveau de la surface du dépôt ou de la

surface de coupe et la troisième concerne les pores ou plutôt des fissures qui traversent le dépôt, de sa surface jusqu'au substrat [67].

I.10.3. Adhérence et dureté

Plusieurs mécanismes interviennent sur l'adhérence du dépôt au substrat tels que la diffusion, les réactions chimiques, des forces électrostatiques, l'accrochage mécanique, etc. [68, 69].

Cependant, dans le cas des dépôts élabores par projection a l'arc, l'adhérence est générée essentiellement par trois types de liaisons [70,71] :

1- l'accrochage mécanique,

2- les liaisons chimiques,

3- les liaisons métalliques.

En considérant la solidification rapide des particules et la microstructure lamellaire des dépôts, l'accrochage mécanique est le mécanisme principal d'adhérence. Le comportement mécanique du dépôt et en particulier son adhésion/cohésion dépendent de la morphologie des lamelles, des aires de contact réel entre les lamelles ainsi que de la rugosité du substrat [72, 73].

La préparation du substrat avant projection détermine donc en grande partie l'adhérence finale du dépôt. Ainsi, un sablage adapte (particules projetées, contrôle des contraintes de compression générées au voisinage de la surface et conditions de préchauffage éventuel du substrat) favorisera l'accrochage mécanique des particules. De plus, les opérations de nettoyage et de dégraissage du substrat ainsi que l'élimination des résidus de sablage favorisent un bon contact entre les lamelles étalées et le substrat [56, 74].

La micro dureté est une propriété significative parce qu'elle donne une indication de la résistance à l'usure abrasive. Elle est affectée par la teneur en oxydes et la porosité du dépôt.

La dureté des dépôts dépend donc de la nature du gaz de projection. Pour des dépôts d'acier, il a été observe que, avec de l'air comme gaz d'atomisation, une teneur en oxydes plus élevée conduit à une dureté plus élevée, mais en utilisant de l'azote, une meilleure conservation du carbone permet aussi une augmentation de la dureté avec une teneur en oxyde limitée.

L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt [70, 65].

I.10.4. Resistance à la corrosion

La corrosion, et en particulier l'oxydation, reste l'un des plus grands problèmes techniques auquel on doit faire face. Chaque année dans les pays développés, la corrosion

détruit l'équivalent de 3 a 5 % du produit intérieur brut. Les dépôts réalises par projection thermique peuvent en particulier prémunir de la corrosion des structures en acier et en fer [75].

La résistance à la corrosion des dépôts dépend de leur microstructure et de la résistance à la corrosion des matériaux qui les constituent. Il faut en effet prendre en compte la corrosion du substrat à travers des pores traversant ou d'autres défauts dans le dépôt et les surfaces au contact. Il peut également se produire une corrosion galvanique du dépôt ou du substrat.

Celle-ci peut aussi se produire entre deux phases ou constituants du dépôt lui-même. Le colmatage d'un dépôt poreux peut diminuer significativement le risque de corrosion générale et galvanique du dépôt [78, 77].

Les dépôts réalisés par projection thermique ont fondamentalement trois inconvénients quand ils sont utilisés pour lutter la corrosion.

- Le premier point faible est la teneur en oxydes qui est générée pendant la projection. Il convient de noter que la présence d'oxydes dans le dépôt diminue sa passivité [78,79].
- Le deuxième inconvénient réside dans la présence de pores ouverts et de fissures entre les lamelles, par lesquelles les environnements corrosifs pénètrent jusqu'au substrat.

Les espaces entre les lamelles sont a l' origine également de la corrosion caverneuse

- Le troisième est la dégradation des matériaux constitutifs des dépôts

Pendant la projection. Certains éléments tels que le chrome et l'aluminium sont partiellement oxydes. En raison de ce phénomène, la composition chimique du dépôt est différente de celle Du matériau projeté [80, 81].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement les différentes technique de projection thermique, puis nous avons détaillé la couche d'oxyde et la morphologie de l'étalement pendant la formation des lamelles lors de l'impact oblique d'une goutte d'aluminium qui l'objet des travaux de thèse présentés

Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation mathématique de transfert de chaleur et l'écoulement diphasique turbulent de fluide incompressible en régime variable, ou les modèles de fermeture sont abordés.

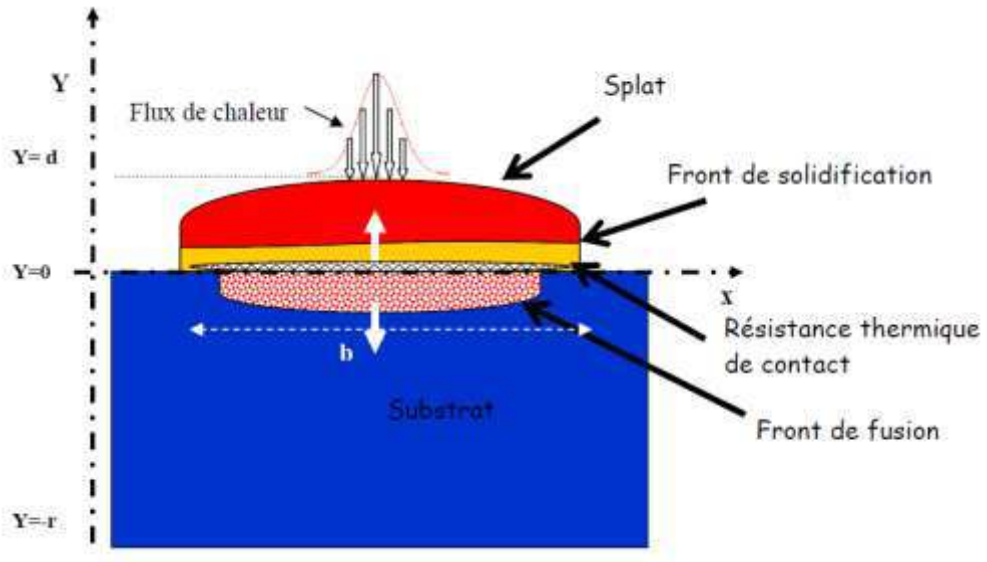
Depuis quelque décennie, Prandtl, Navier-stockes et Reynolds ont pu découvrir les lois fondamentales de la mécanique des fluides, il restait aux ingénieurs et l'homme de science exploiter ces loi et les mètres au service de l'homme.

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales.

Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie.

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…).

Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon [82].

La mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie.

II.2. Modélisation de l'écoulement des fluides

Dans un repère cartésien, les écoulements newtoniens, incompressibles et visqueux sont quantifies par les équations définies dans les paragraphes ci-après.

II.2.1. L'équation de la continuité

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

L'équation de continuité globale est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho\vec{\nabla}+\vec{V}=0 \qquad \text{(II-1)}$$

Dans un système de coordonnées cartésiennes, la vitesse $\vec{V}$ = (u, v, w) et **ρ** c'est la densité.

Donc l'équation devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad \text{(II-2)}$$

II.2.2 .L'équation de quantité de mouvement

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

$$\rho\left\{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v}\nabla\vec{v}\right\} = -\nabla P + \nabla^2\vec{v}\rho\vec{g} \qquad \text{(II-3)}$$

Ou **ρ** la densité considéré variable avec le temps, **μ** fi la viscosité dynamique aussi variable, P la pression et $\vec{g}$ la gravité. [83]

II.2.3. Équation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie par

$$\mathbf{Pc}\left\{\frac{\partial T}{\partial t}+\overrightarrow{v.\nabla T}\right\}=\mathbf{k}\nabla^{2}\mathbf{T}+\mathbf{q} \qquad \text{(II-4)}$$

T : température,

q : source volumique. [83]

II.3. Modèle thermique

Les modèles de transfert thermique unidimensionnel couplés aux modèles qui décrivent l'étalement de la matière sur le substrat traite le refroidissement et la solidification des lamelles comme un problème uniquement thermique. Ce sont des modèles simples comparés aux modèles de l'écoulement de la phase fluide comme ceux développés par Mostaghimi et Al qui traite la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leur morphologie, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière .

II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) [87]. C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré comme une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan [88]. En général ces méthodes cherchent à approcher la position du front de solidification/fusion au cours du temps, et se divisent alors en deux catégories principales:

- les méthodes à grille mobile ou déformable : aussi appelées méthodes de suivi de front (front tracking).
- Les méthodes à grille spatiale fixe : qui regroupent par exemple la méthode de la chaleur spécifique équivalente, la méthode de la source de chaleur fictive et la méthode d'enthalpie.

II.3.1.1. Méthode à grille mobile

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante [89] :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

$$\boldsymbol{\rho_l c_{pl} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\lambda_l \nabla T) = 0} \quad \text{(II-5)}$$

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

$$\boldsymbol{\rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\lambda_s \nabla T) = 0} \quad \text{(II-6)}$$

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

$$\boldsymbol{\rho L_f \vartheta_n = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial n}} \quad \text{(II-7)}$$

Dans les équations ci- dessus,

n représente la normale à l'interface $\boldsymbol{\Gamma(x,t) = 0}$

$\boldsymbol{\vartheta_n}$ la composante normale de la vitesse de déplacement de l'interface liquide/solide.

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif, le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier [87].

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

II.3.1.2. Méthode à grille fixe

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

II.3.1.2.a. Méthode d'enthalpie

La méthode d'enthalpie à maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide. Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et al [90]. Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'à aujourd'hui [91].

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

$$\mathbf{H(T) = \int_{T_{ref}}^{T} c_p(T)dT + f_l L_l} \qquad \text{(II-8)}$$

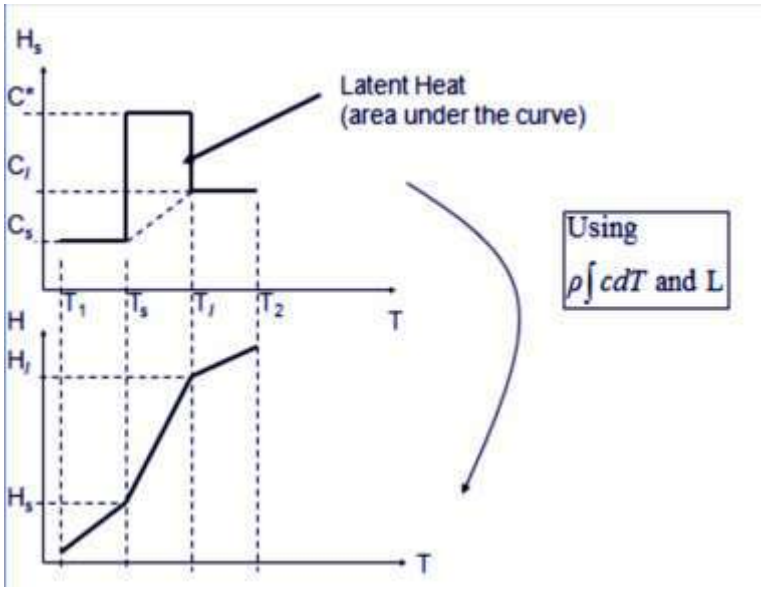


Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température [92]

La conservation de l'énergie s'exprime alors [92].

$$\boldsymbol{\rho \frac{\partial(H)}{\partial t} + \nabla.(\rho H v) = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q} \qquad \text{(II-9)}$$

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

$$\boldsymbol{\rho \frac{\partial(H)}{\partial t} + \rho v.\nabla.H = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q} \qquad \text{(II-10)}$$

Et en fonction de la température

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p v.\nabla.T = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q + \rho L_f \frac{df_s}{dt} \quad \text{(II-11)}$$

II.3.1.2.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique c_p[92]. Ainsi, si le chemin de solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} = \rho c_p . \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L_f \frac{df_s}{dT}\frac{dT}{dt} = \rho c_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{(II-12)}$$

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

$$\rho c_p^{eq} = \rho c_p - \rho L_f \frac{df_s}{dT} \quad \text{(II-13)}$$

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

$$\rho c_p^{eq} \frac{\partial (T)}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \text{(II-14)}$$

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

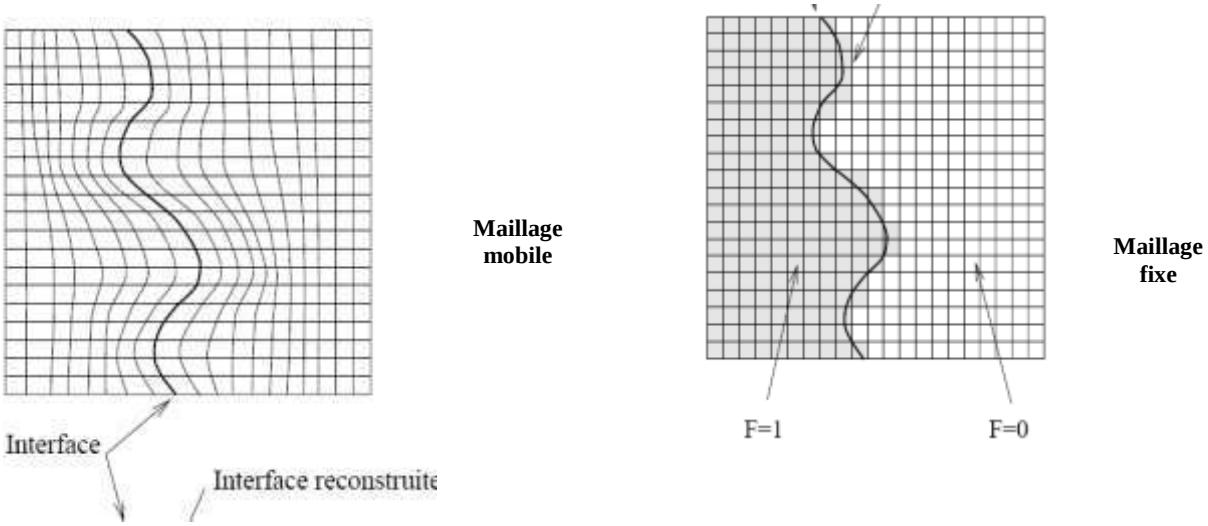
II.4. Modèle thermique utilisé

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

$$\rho c_p^{ea} \left[\frac{\partial (T)}{\partial t} + (V.\nabla)T\right] = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \text{(II-15)}$$

II.5.Calcul d'interfaces

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



a) Méthode lagrangienne **b)** Méthode Eulérienne

Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface
a) méthode Lagrangienne**, b)** méthode Eulérienne**,** [93].

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

- **La méthode eulérienne** : elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides .l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première [94] ; cependant de part sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation couleur.

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

Les méthodes de suivi de front

Les méthodes de suivi de volume

II.5.1. Les méthodes de suivi de front

Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

c) Méthode de ligne de niveau (level set)

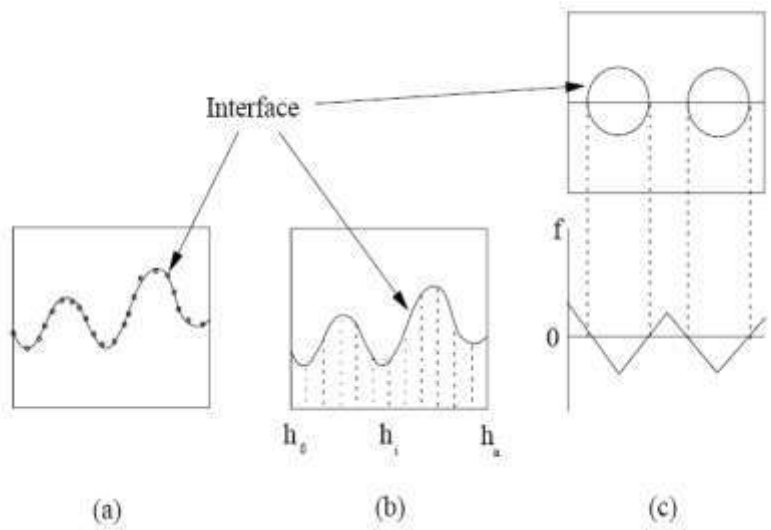


Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de front

a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau, [95].

II.5.2. Les méthodes de suivi de volume

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

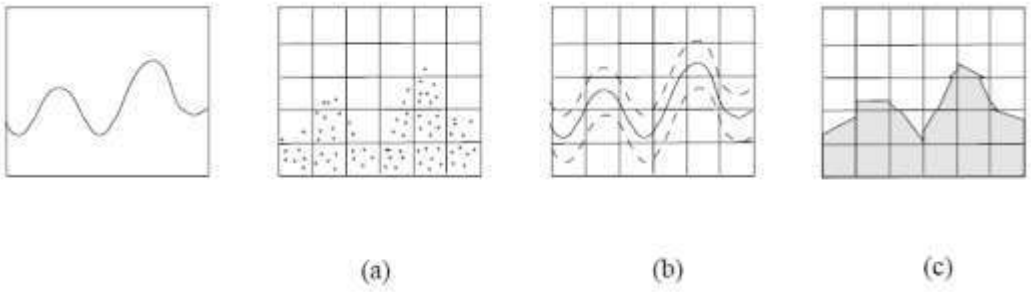


Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [96,97].

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

d) On utilise pour la méthode VOF (volume of fluid) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur de zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide (figure II-6).

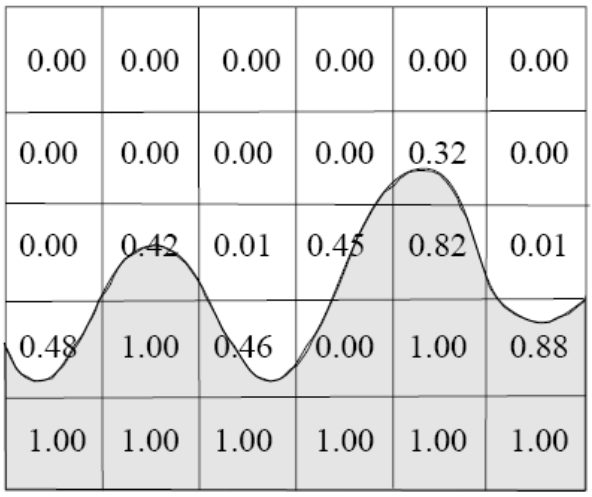


Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [98].

II.5.3. La Méthode VOF CIAM

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

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

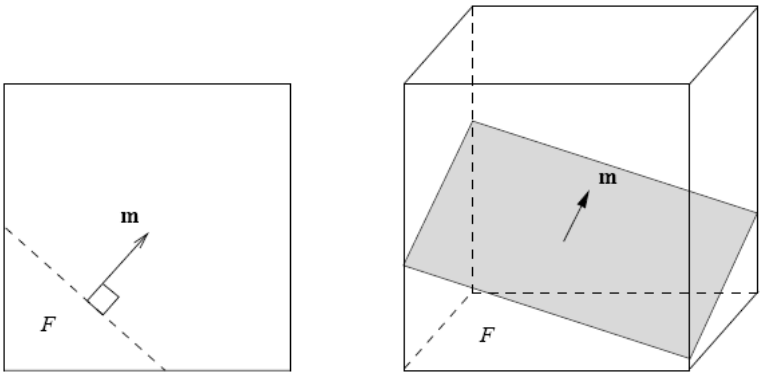


Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique [99].

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

$$\begin{cases} \nabla . \mathbf{u} = 0 \\ \dfrac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} . \nabla C = 0 \\ \rho \left[\dfrac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla . (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) \right] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla . (\mu [\nabla \mathbf{u} + \nabla^{\mathbf{T}} \mathbf{u}]) - \sigma \nabla \left[\dfrac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \right] . \dfrac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \\ \rho c_p^{ea} \left[\dfrac{\partial (T)}{\partial t} + (\mathbf{u} . \nabla) T \right] = \nabla . (\lambda \nabla T) + Q \end{cases} \quad (\mathbf{II-16})$$

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

$$\mathbf{Var_i} = \mathbf{C} . \mathbf{Var_{goutte}} + (\mathbf{1} - \mathbf{C}) . \mathbf{Var_{air}} \quad \text{(II-17)}$$

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc.

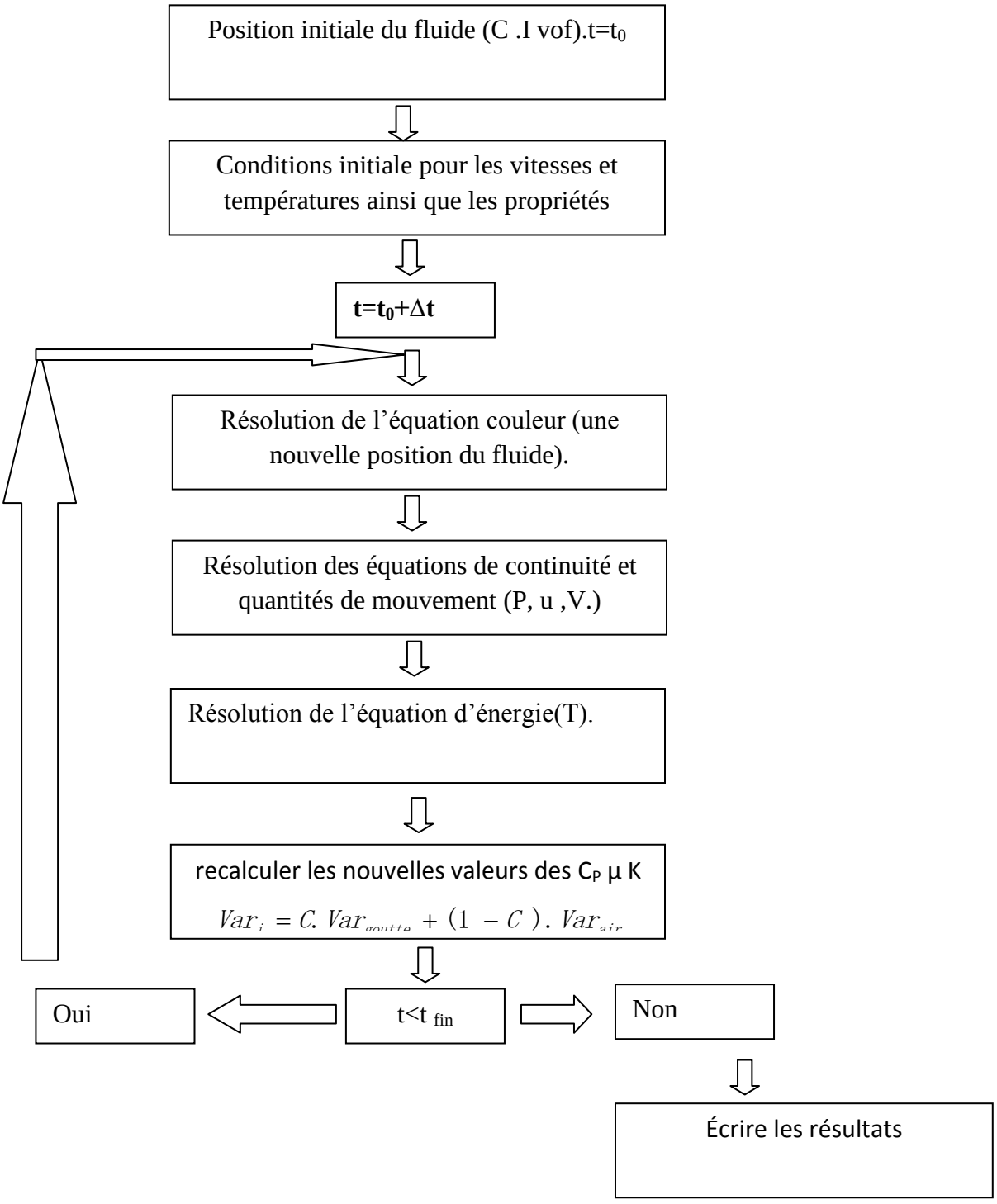


Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps [86].

Conclusion

Dans ce chapitre, on à présenté tous d'abord, les formulations mathématiques du modèle dynamique et thermique utilisées dans cette étude. Ainsi une présentation de la méthode de volume de fluide (VOF) utilisée pour simuler le transport de fluide bi phasique. La méthode est d'écrite en 2D. C'est une approche très concrète du problème totalement déférente des approches classiques qui consistent à utiliser des schémas de discrétisation. 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…). C'est pourquoi l'outil numérique devient rapidement indispensable afin de considérer les échelles de temps et d'espace fortement concernés.

Introduction

Les équations décrites au deuxième chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes :

• Méthodes des différences finies (MDF).

• Méthodes des éléments finis (MEF).

• Méthodes des volumes finis (MVF).

Dans ce chapitre, en se basant sur la méthode des éléments finis. Cette dernière sera appliquée à la résolution de notre problème thermique par notre simulateur ANSYS.

III.1. Discrétisation des EDP

III.1.1. les trois grandes familles de méthodes

Pour passer d'un problème exact continu régit par EDP au problème approché discret, il existe trois grande famille de méthodes : [97]

- Méthode différances finis.
- Méthode volumes finis.
- Méthode éléments finis.

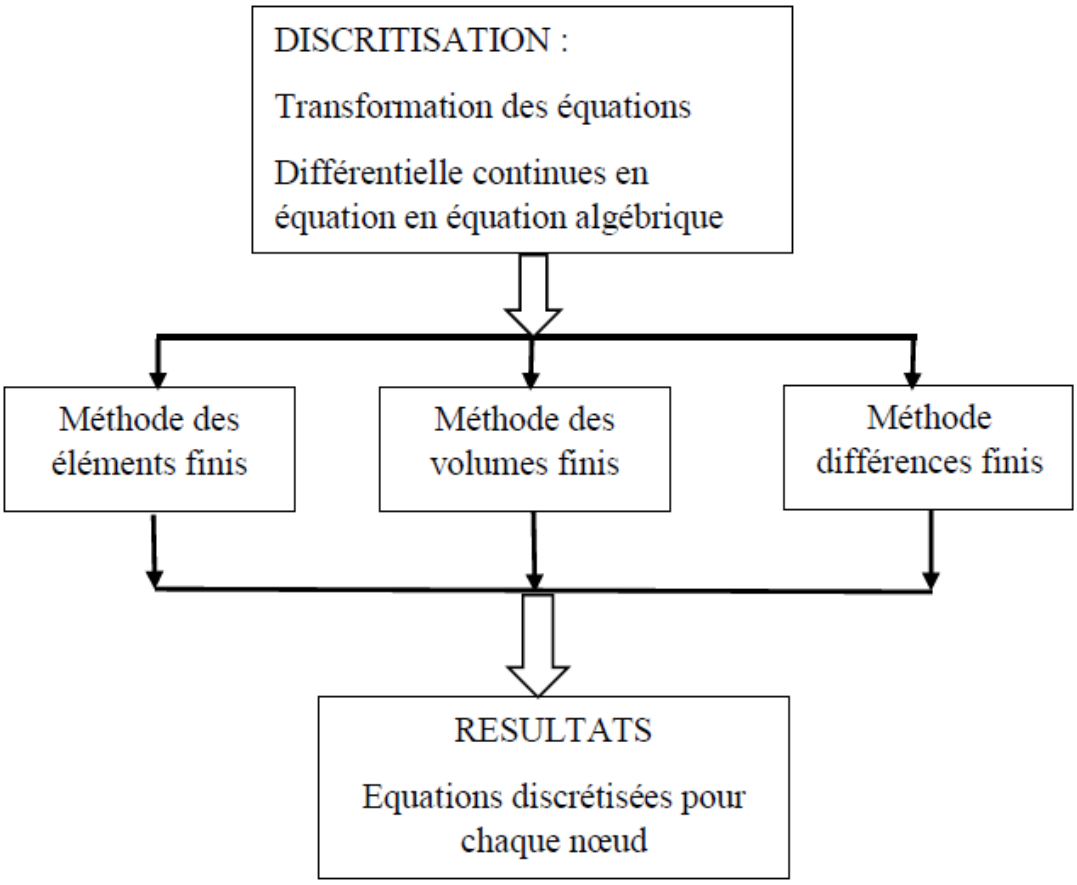


Figure III.1 : Méthode de discrétisations [98]

La méthode numérique comporte trois pas distincts :

- L'approximation de la variable inconnue par différents types de fonctions simples ;
- Discrétisation par la substitution de l'approximation dans les équations différentielles et l'obtention d'un système d'équations algébriques ;
- Résolution du système d'équations algébrique.

La principale différence entre les trois méthodes numériques consiste dans le type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisations. [98]

III.1.1.1. Méthode des différences finies

Cette méthode est structurée sur la discrétisation du domaine d'étude suivant le développement limité de la série de Taylor en chaque nœud du maillage, ainsi l'équation différentielle est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds. La distribution de la grandeur en question est obtenue par la résolution du système d'équation algébrique. Elle consiste à approximer les dérivées de l'EDP par des troncatures de séries de Taylor. La

substitution de ces approximations dans l'équation différentielle donne les équations aux différences finies.

- **Avantages**: grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul

- **Inconvénients**: Limitation de la géométrie des domaines de calculs, difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les d'étrivées ou les gradients de l'inconnue et en général absence de résultats de majoration d'erreurs

III.1.1.2.Méthode des volumes finis

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de volume de contrôle juxtaposés. Chacun de ces derniers englobe « un nœud principale».
La méthode intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle de l'approximation discrète conservation et est particulièrement bien adaptée bien aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple avec est simple avec des volumes élémentaires rectangles. [99]

- **Avantage :**

- Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (Continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage.
- Mise en œuvre relativement facile ;
- Applicable aux géométrises complexes ;
- Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande). [98]

- **Inconvénients :**

- Moins précis que les méthodes spectrales ;
- On dispose de peu de résultats de convergence. [98]

III.1.1.2.1.Méthode Volume de Fluide VOF (Volume Of Fluide)

[100,101] utilise la fonction de phase comme la fraction volumique d'un fluide par rapport à l'autre [102]. La fraction volumique dans la cellule (i, j) est défini par :

$$C_{ij} = \left(\frac{1}{h}\right)^2 \int_0^h \int_0^h \mathrm{X}(\mathrm{x}, \mathrm{y})\, dx\, dy$$

Où X(x, y) est la fonction caractéristique, elle est égale 1 dans un fluide et 0 dans l'autre. Dans chacune des cellules contenant uniquement du fluide 1 ou uniquement du fluide 2, la fraction volumique est égale respectivement à 1 ou 0. Par contre dans les cellules traversées par

l'interface, la fraction volumique est strictement comprise entre zéro et un. Il est nécessaire de déterminer la position de l'interface à chaque instant à partir du champ de fraction volumique pendant l'étape de reconstruction de l'interface.

III.1.1.3.Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à repartir le domaine d'étude en zones élémentaires (éléments finis) et à représenter l'inconnue par une approximation polynomiale d'ordre un ou deux dans chacune de ces zones, puis, l'erreur due à l'approximation doit être minimisée. Cette méthode est très performante dans les géométries complexes mais elle nécessite un espace mémoire important. D'autre part, La simulation numérique est de plus en plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour modéliser les écoulements que les transferts thermiques dans le moule. Des logiciels comme **ANSYS** permettent en effet de déterminer des répartitions de température à la surface du moule et la pression, la vitesse d'écoulement dans le moule ainsi le temps de refroidissement. La conception du moule et en particulier du système de refroidissement est donc basée sur l'expérience de l'utilisateur uniquement**.**

- **Avantage**

- Traitement possible de géométrise complexes.
- Détermination plus naturelle des conditions aux limites.
- Possibilité de démonstrations mathématique de convergence.

- **Inconvénients**

- Complexité de mise en œuvre.
- Coût en temps de calcul et mémoire.

III.1.1.3.1. Démarche éléments finis

Les principales étapes de constructions d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivants :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations. [103]

III.1.1.3.2.Organigramme d'un logiciel élément finis

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristiques ou blocs fonctionnels décrits sur la **figure III.3**

Logiciel **Utilisateur**

Préprocesseur interactif

Analyse du problème

Fonctions

- Lecture des données

Donnée

-Coordonnées des nœuds

-Définition des éléments « mailles »

-Paramètres physiques

-Sollicitations

-Conditions aux limites

Vérifications

-Visualisation du maillage

-Lecture du « fichier résultat » ou « question –réponses –vérifications »

Création du fichier des données

Vérification des données

Bloc calcul non interactif

Fonctions

-Calcule des matrices et vecteurs et résolution de système d'équations

- Calcule des matrices élémentaires (comportement, sollicitations).

- Assemblage dans les matrices globales.

Résolution

- Prise en compte des sollicitations nodales
- Prise en compte des conditions aux limites
- Résolution

Création du fichier des données

Vérification des calcules

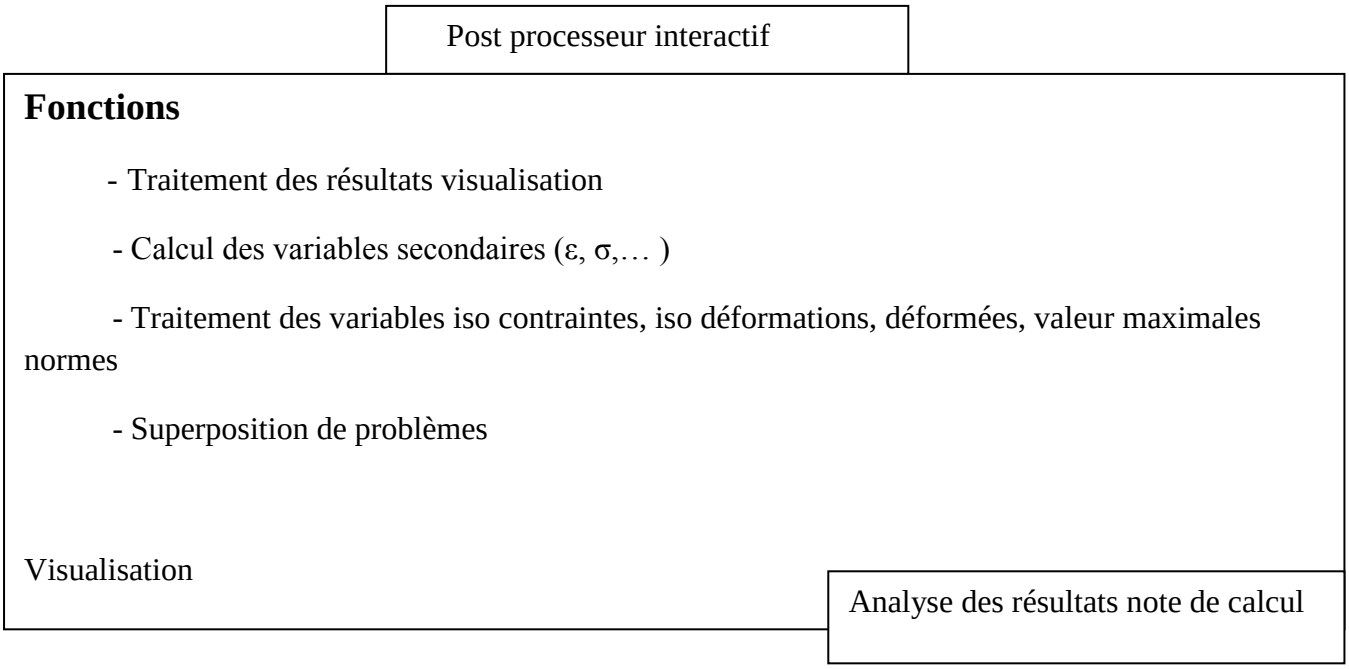


Figure III.2 : Organigramme d'un logiciel éléments finis [103].

III.1.1.3.3. Présentation de la méthode

Comme on a précédemment évoqué, 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.

III.2. Forme générale des équations du système [104]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho V_X C_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho V_Y C_{\phi}\phi\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)+S_{\phi} \qquad \text{(III-1)}$$

Ou :

φ: Variable généralisée

Cφ: Coefficient d'advection transitoire.

ΦΓ: Coefficient de diffusion.

Sφ: Termes source

Variable Ø	coefficient d'advection $c_{\emptyset}$	Diffusivité $\Gamma_{\emptyset}$	Termes source $S_{\emptyset}$
V_X	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}$
Vy	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}$
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. [105]

III.3.choix d'un maillage

La méthode des éléments finis repose sur découpage de l espace selon un maillage d'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'in territ de choisir des maillage plus complexe, il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage prés des endroits d'in tétères (par exemple aux endroits ou l'on pense que la solution va beaucoup varier) ,cependant il faut veiller à avoir des «éléments faiblement Distordus (se rapprocher d'un polygone régulier),plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l »équation aux dériva ès partiels. même si une géométriquement complexe peut être maillée avec des éléments tétraédriques, elles mais exigent de nombreux éléments et que mai conduire à lécha parce que la simulation des ressources informatiques même un volume de forme régulière mai exigent de nombreux éléments tétraédriques si elle a un ratio très grand aspect ,ici les éléments hexaèdres ou d'un coin serait un meilleur choix ,(**Figure III.3**) « objet avec un aspect Ratio large », illustre cette différence, il montre que le

nombre d »éléments tétraédrique (a) est beaucoup plus grand quelle nombre d »élément hexaédrique (b), si une densité de maillage similaire est maintenue sur la section transversal.

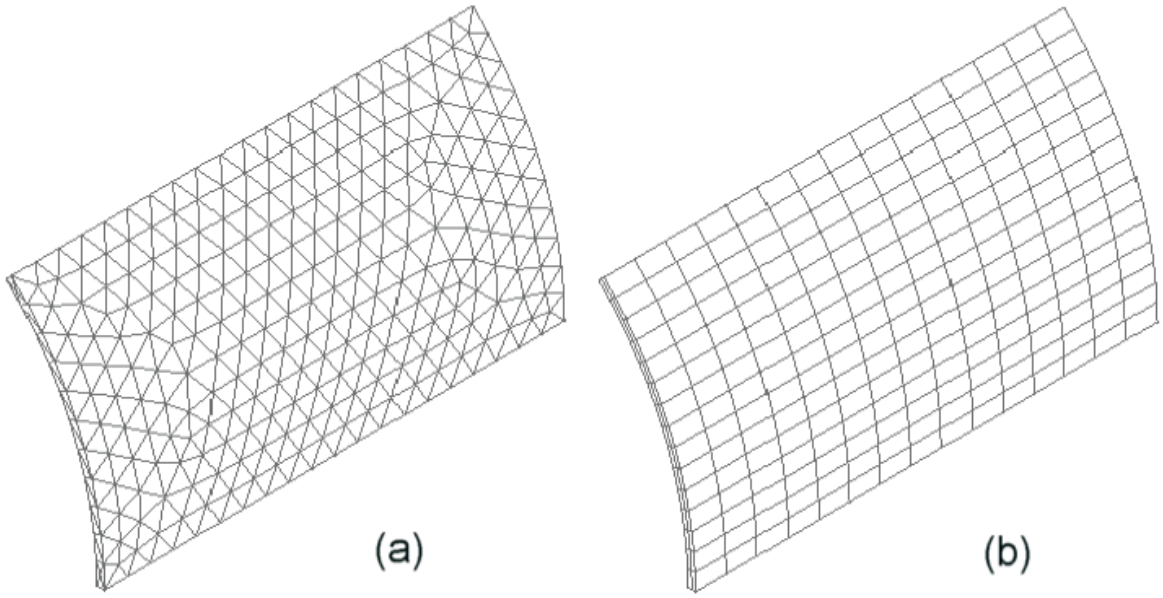


Figure III.3 : (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique

III.3 .1.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 [106].

$$([A_e^{TRANSIENT}] + [A_e^{ADVECTION}] + [A_e^{DIFFUSIN}])\{\phi_e\} = \{S_e^{\phi}\} \quad \text{(III-2)}$$

$$[\mathbf{A_e^{TRANSIENT}}] = \int \mathbf{W^e} \frac{(\partial \rho \mathbf{C_\phi \phi})^e}{\partial \mathbf{t}} \mathrm{d}(\mathbf{Vol}) \quad \text{(III-3)}$$

$$[\mathbf{A_e^{ADVECTION}}] = \frac{\mathbf{d}(\rho \mathbf{C_\phi V_s \phi})}{\mathbf{ds}} \int \mathbf{W^e} \mathrm{d}(\mathbf{Vol}) \quad \text{(III-4)}$$

$$[A_e^{DIFFUSIN}] = \int \left(W_x^e \Gamma_\phi W_x^e + W_x^e \Gamma_\phi W_x^e\right) \mathrm{d}(Vol) \quad \text{(III-5)}$$

$$\mathbf{S_e^{\phi}} = \int \mathbf{W^e S_\phi} \mathrm{d}(\mathbf{Vol}) \quad \text{(III-6)}$$

Pour les intégrales élémentaire, la méthode galérien des résiduels pesés est employé.

III.3.1.1.Terme temporelle

Le premier des contributions de l'élémentaire est le terme de transition, sa forme générale est simplement [106] :

$$[A_e^{transien}] = \int w^e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} \mathrm{d}\,(\mathrm{vol}) \quad \text{(III-7)}$$

Avec :

W_e= la fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme pour le nœud :

$$\int w^e \frac{(\partial \rho C \phi \phi)^2}{\partial t} \mathrm{d}\,(\mathrm{vol}) = \int w_i{}^e\, \rho c \phi w_j{}^e \mathrm{d}(\mathrm{vol}) \frac{\partial \phi_i^e}{\partial t} + \int w_i^e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} w_j^e \,\mathrm{d}\,(\mathrm{vol})\, \phi_j^e \quad \text{(III-8)}$$

Les indices inférieurs I et j indiquent le nombre de nœud, si la deuxième partie de l'équation (III-7) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme :

$$\mathrm{Mij} = \int w_i^e\, \rho\, \mathrm{c}\phi w_j^e \mathrm{d}\,(\mathrm{vol}) \quad \text{(III-9)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée

$$\mathrm{Mij} = \delta \mathrm{ij} \int w_i^e\, \rho \mathrm{c}\emptyset\, \mathrm{d}\,(\mathrm{vol}) \quad \text{(III-10)}$$

Ou: δij = delta de kronecker (o si i≠j, 1si i=j) il ya deux méthode d'intégration temporelles : Newmarket et (Packard différence) différence en arrière.

La methode d'interaction de temps de newmank ou ,la formulation implicite de base node, exprime l'étape de temps courant comme la niéme étape de frois et l'éxpression comporte les résultats précédents d'une étape dee temps.

$$(\rho\emptyset)\mathrm{n} = (\rho\emptyset)_{\mathrm{n-1}} + \nabla \mathrm{t}[\delta(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}) + (1\text{-}\delta)\,(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{\mathrm{n-1}} \quad \text{(III-11)}$$

Ou :

δ= coefficient d'intégration de temps pour la méthode new mark l'équation (III-9) est écrite comme suite :

$$(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{\mathrm{n}} = \frac{1}{\nabla t \delta}(\rho\emptyset)_{\mathrm{n}} - \frac{1}{\nabla t \delta}(\rho\emptyset)_{\mathrm{n-1}} + (1 - \frac{1}{\delta}) \quad \text{(III-12)}$$

Il y a deux méthodes d'intégration temporelles : Newmark et (backwarddifference) 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.

$$(\rho\emptyset)_{\mathrm{n}} = (\rho\emptyset)_{\mathrm{n-1}} + \Delta \mathrm{t}\left(\delta\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathrm{t}}\right)_{\mathrm{n}} + (1 - \delta)\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathrm{t}}\right)_{\mathrm{n-1}}\right) \quad \text{(III-13)}$$

Où :

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

L'équation (III.11) est écrite comme suite:

$$\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_n = \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_{n-1} + \left(1 - \frac{1}{\delta}\right)\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{n-1} \quad \text{(III-14)}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\emptyset)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\emptyset)_n}{2\Delta t} \quad \text{(III-15)}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_n}{\Delta t} - \frac{(\rho\emptyset)_{n-1}}{\Delta t} \quad \text{(III-16)}$$

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

III.3.1.2. Terme d'advection

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

III.3.1.3. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des lignes caractéristiques. Il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transportée dans un domaine connu de vitesse. Voir Le Schéma III.4: " l'Approche des ligne de courant D'Upwind ".

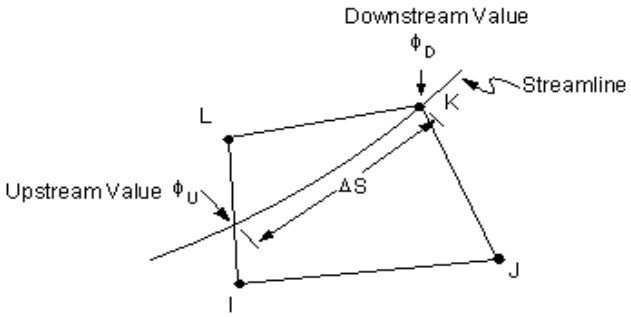


Figure III.4 : Approche de ligne de courant d'Upwind [105].

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

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c'est-à-dire, tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit [105] :

$$\frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_x \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_y \emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III-17)}$$

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{ds} \int W^e d(vol) \qquad \text{(III-18)}$$

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

$$\frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s)}{ds} = \frac{(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_U - (\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_D}{\Delta s} \qquad \text{(III-19)}$$

Où:

D = Indice de la valeur au niveau du nœud aval

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

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

La valeur à l'endroit ascendant est inconnue mais peut être exprimée en termes de valeurs nodales inconnues qu'il est entre l'amont et l'aval.

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

III.3.1.4. Method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection [105] :

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

$$\mathbf{Vye\partial We\partial yVxe\partial pc\emptyset\emptyset\partial x + Vye\partial pc\emptyset\emptyset\partial y}\text{dvol} \quad \text{(III-20)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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

III.3.1.5. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

L'approche de COLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué. Dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesses, (les vitesses nodales élément-élément-based) qui sont faites pour satisfaire l'équation de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement [105].

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

$$\mathbf{Vye\partial We\partial yVxe\partial pc\emptyset\emptyset\partial x + Vye\partial pc\emptyset\emptyset\partial y}\text{dvol}$$

(III-21)

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

III.3.2.Terme de Diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au-dessus du domaine de problème après la multiplication par la fonction pesante [105].

$$Diffusion\ contribution = \int \boldsymbol{W^e}\frac{\partial}{\partial x}\left(\boldsymbol{\Gamma_\phi}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\boldsymbol{d(Vol)} + \int \boldsymbol{W^e}\frac{\partial}{\partial y}\left(\boldsymbol{\Gamma_\phi}\frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right)\boldsymbol{d(Vol)} \qquad \text{(III-22)}$$

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée [106] :

$$\int \boldsymbol{W^e}\frac{\partial}{\partial x}\left(\boldsymbol{\Gamma_\phi}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\boldsymbol{d(Vol)} = \int \frac{\partial W^e}{\partial x}\boldsymbol{\Gamma_\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\mathbf{d(Vol)} \qquad \text{(III-23)}$$

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

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = \mathbf{W_x^e}\emptyset \qquad \text{(III-24)}$$

$$\mathbf{W_x^e} = \frac{\partial \mathbf{W^e}}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{(III-25)}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[A_e^{Diffusion}\right] = \int \left(W_x^e \boldsymbol{\Gamma_\phi} \mathbf{W_x^e} + W_y^e \boldsymbol{\Gamma_\phi} \mathbf{W_y^e}\right) d(Vol) \quad \text{(III-26)}$$

III.3.3.Termes source

L'évaluation des termes de source se fait comme suite [106]:

$$\mathbf{S_\emptyset^e} = \int \mathbf{W^e S_\emptyset d(Vol)} \quad \text{(III-27)}$$

Conclusion

Ce chapitre a été consacré principalement a la résolution des éléments finis ainsi la mise en œuvre de la méthode des éléments finis, puis la forme généralisée des équations de système et discrétisation ; et enfin la stratégie de calcul pour la résolution du système dans le temps. L'étape suivante consiste à réaliser la simulation de l'impact d'une goutte sur substrat sec et non oxydé puis la simulation de l'impacte d'une goutte sur substrat d'acier oxydé on varie l'épaisseur de la couche d'oxydation pour voir son influence sur la formation de lamelle.

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentant les résultats de l'étude de la situation numérique à l'aide d'un logiciel ,c'est le code ANSYS , de l'impact de goutte plaine d'aluminium sur un substrat d'acier d'un part ; et d'autre part l'étude de l'effet de la présence des pics et gouttelette oblique de substrat sur le processus de l'étalement de particule lors de formation des dépôts d'aluminium, pour analyser l'influence de l'oxydation sur la formation de lamelle.

IV.1. Logiciel d'analyse d'ANSYS

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

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

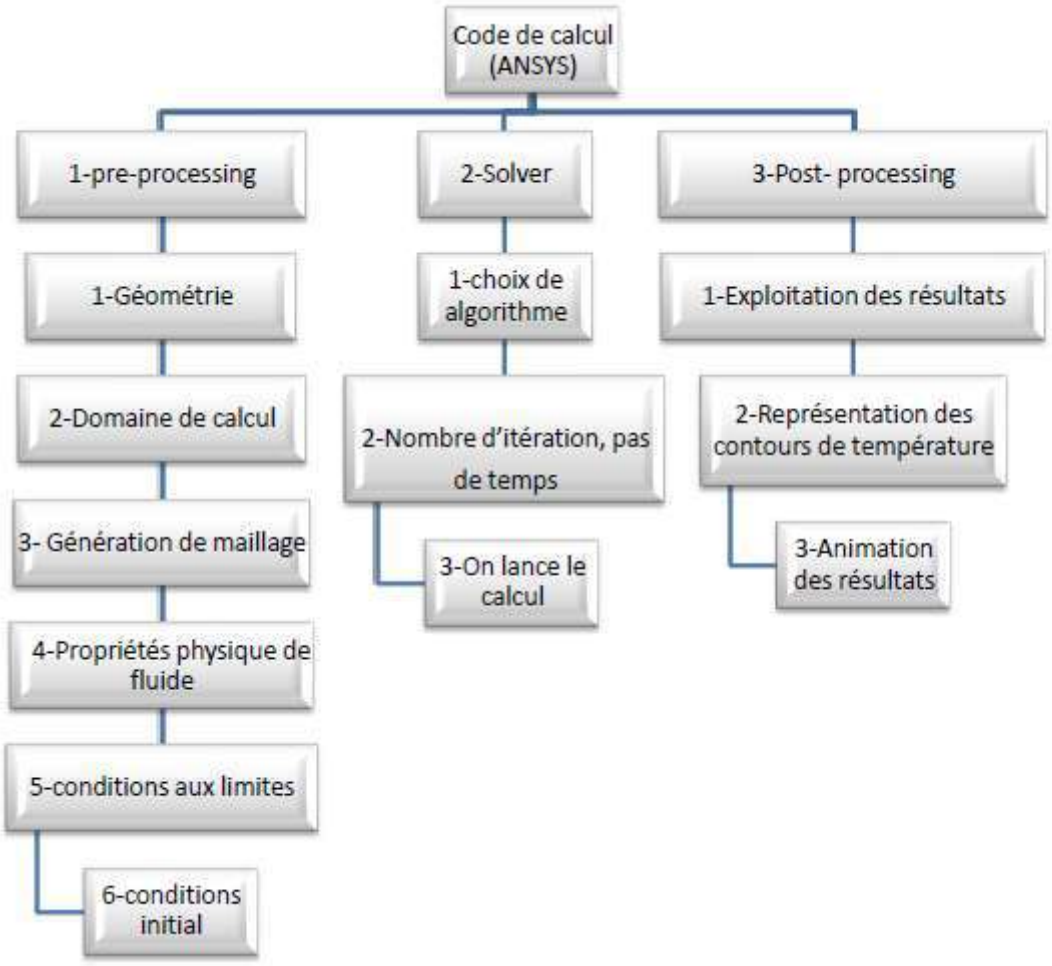


Figure IV.1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS.

IV.2. Matériaux utilisés

Dans cette étude numérique nous travaillons sur des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat métalliques (acier d'outil) le choix de l'alumine a été orienté par des nombreuses études déjà menées, telle que le travail expérimental de Javad Mostaghimi qui ont été consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'alumine sur substrat en acier ; et qui sera l'objet d'identification de nos résultats.

IV.2.1. L'aluminium

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

- Une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de $1.09.10^{6}$j/kg.
- Une bonne résistivité électrique >1012 Ohm.m [107].
- Une dureté HV sons une charge de 1N de 9.21 Gap [107].
- Une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10^{-5} mm^3 /Nm, à l'abrasion par une bille de sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à $3.10^{-3}mm^3$/Nm lorsque la température augmente à 400°C.
- Une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance a l'oxydation.

Ces performances font de ce matériau l'objet de nombreuses dans des domaines très variés :

- Les applications mécaniques, l'aluminium est l'abrasif le plus répandu de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides.
- Les applications réfractaires, résistance aux hautes températures ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion a hautes température.
- Les applications médicaux ; le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie.
- Les applications électrique et électronique : l'aluminium et utilisée dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation.
- Les application optique : les films d'aluminium permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires [107]

IV.2.2. le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation [108]

Propriétés	Particule : Alumine	Substrat: Acier	Couche d'oxydation	Unité
Densité	2570	7800	5240	(Kg/m³)
Viscosité (cinématique)	°c 0 4.5 E-7 700 4 E-7			(m²/s)
Conductivité thermique solide	°c 400 144 500 147 630 70	°c 200 26	2.9	(W/m K)
Chaleur spécifique	°c 100 400 300 500 400 800 570 1050 580 1038 600 1000	°c 20 460 200 502 500 550	670	(J/Kg K)

CAS A

IV.3. Identification

Pour l'identification, ou l'objective est de justifie le model utilisé; nous proposons pour cette première partie de notre travail de comparer nos résultats de simulation d'impact de goutte sur substrat dans les mêmes conditions des travaux numérique et expérimental de Javad Mostaghimi.

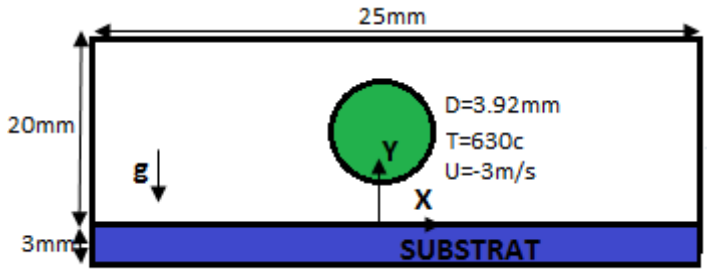
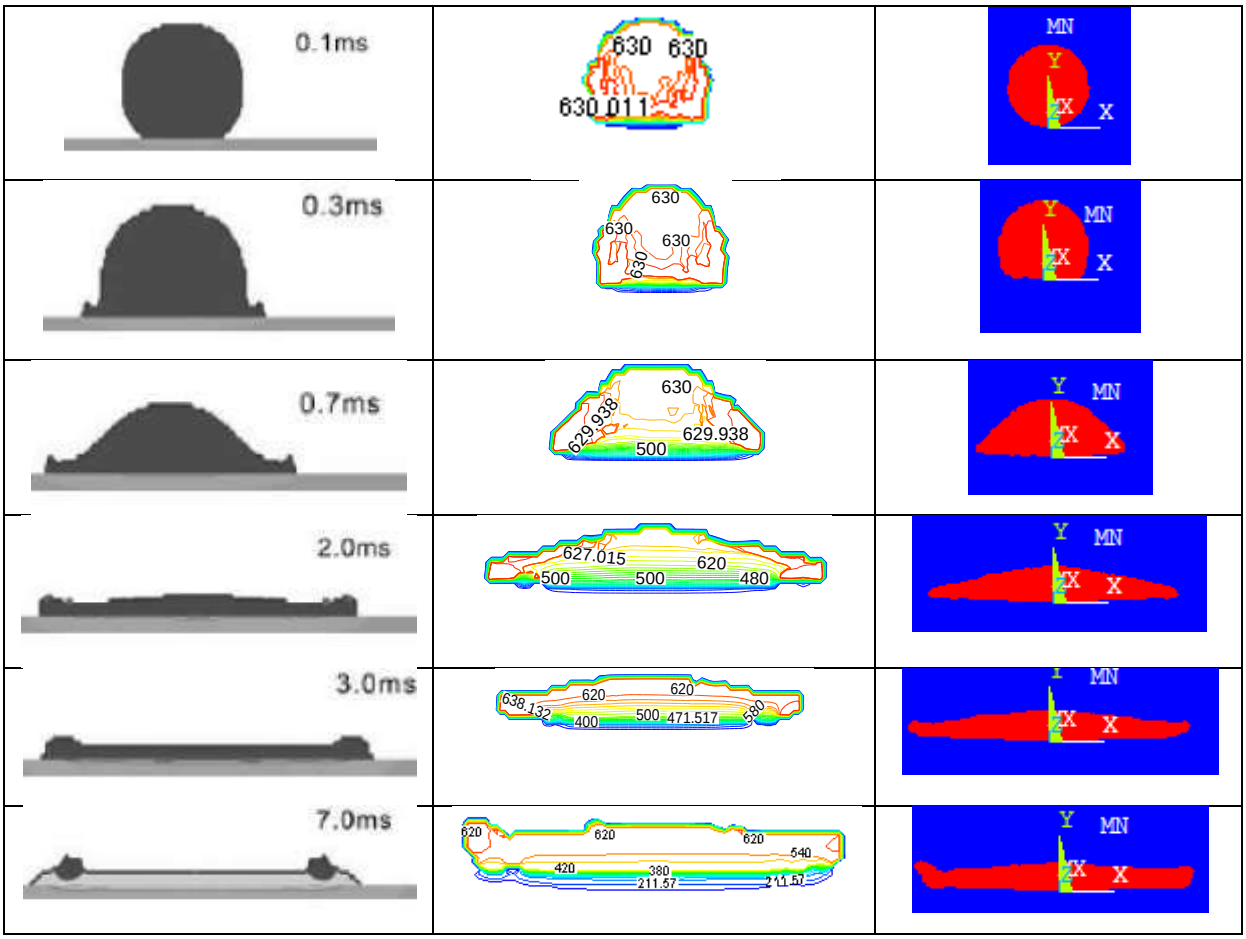


Figure IV. 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification.

IV.4. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus

La figure IV.2 représente les résultats expérimentaux et de simulation d'étalement d'une particule en aluminium plein d'un diamètre de 3.92mm initialement à une température de 630C° et une vitesse de- 3 m/s sur un substrat en acier d'outil initialement à 200 C°. La gouttelette commence à se propagée à 0.01 ms, symétriquement par rapport au point d'impacts, il faut noter que pour les deux résultats le liquide suit la topographie de la surface.



Tableaux IV.3 : impact séquentiel d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C.

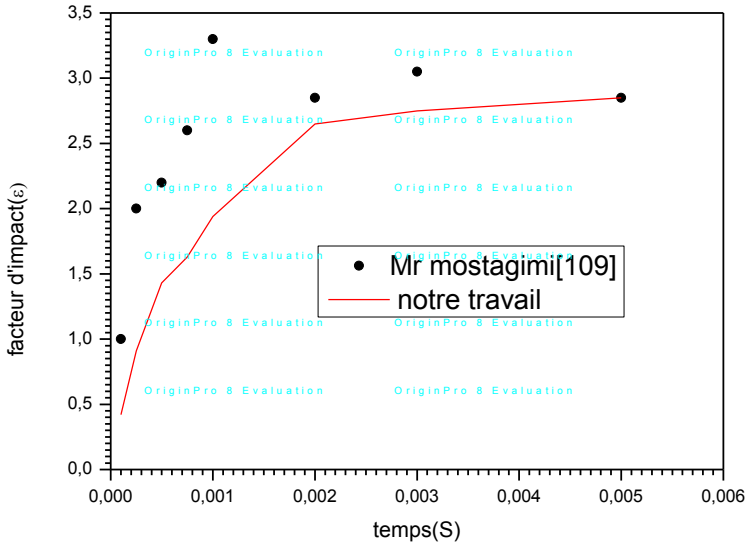


Figure IV. 3 : Facteur d'étalement (cas identification).

La figure IV.3, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium pour les deux cas ,nous notons qu' aux premiers instants, ces facteurs augmentent rapidement ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande si on comparent les deux courbes nous allons remarquer que dans l'expérimentation de Mostaghimi la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 3.27 alors que dans notre simulation elle atteint 3.1.

CAS B

IV.5. Présence de la couche d'oxyde

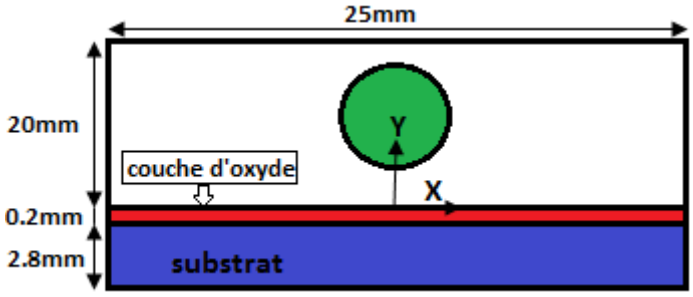


Figure IV. 4 : Schéma représente la couche d'oxyde.

Dans ce cas nous avons fais plusieurs essais pour obtenir la température de transition, quand nous avons prendre la température 100°C on voie qu'il y'a un éclaboussement comme montre la figure (IV. 3a) donc on augmente la température jusqu'à 200°C car il y'a un bon étalement comme montre la figure (IV. 3b).

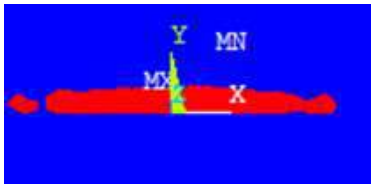


Figure (IV. 3a) cas d'éclaboussement.

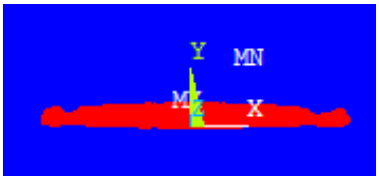


Figure (IV. 3b) cas bien étalement.

CAS C

IV.6.Présence de la couche d'oxyde sous forme de pique

Dans ce cas en vue de l'étude de l'impact oblique d'une goutte d'aluminium nous avons été appelés :

- A utiliser six angles (1°,3°, 5°,7°, 9°,11°) et pour chacun nous avons :
  - Représenté les variations du facteur d'étalement par rapport au temps.
  - Représenté les variations de pression au point d'impact par rapport au temps.
  - Représenté les variations de température pour cinq positions dans le substrat et cela par rapport au temps.
  - Représenté le profile de température au point d'impact.

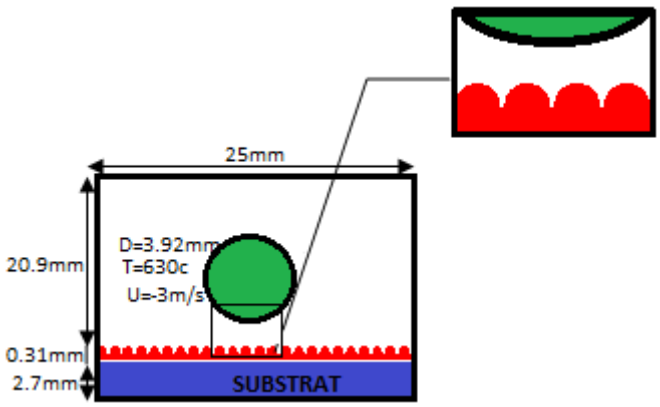


Figure IV. 5 : représente la couche d'oxyde en forme de pique.

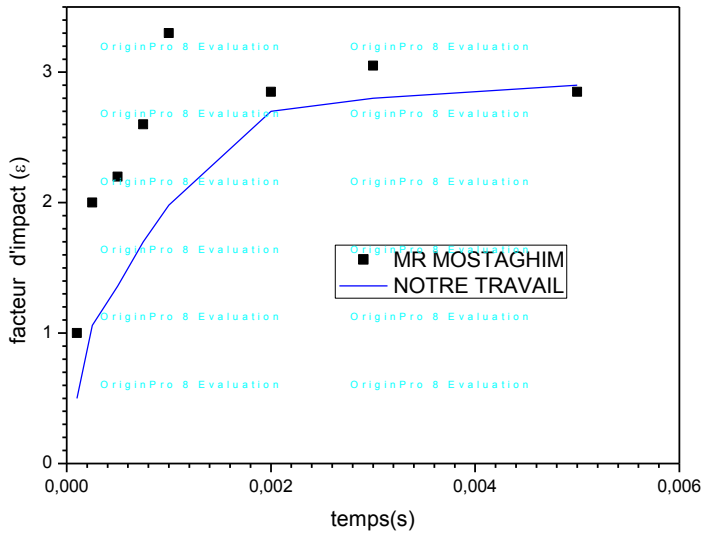


Figure IV. 6 : Facteur d'étalement (présence de la couche d'oxyde en forme de pique).

La figure IV.5, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium pour les deux cas ,nous notons qu' aux premiers instants, ces facteurs augmentent rapidement ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande si on comparant les deux courbes nous allons remarquer que dans l'expérimentation de Mostaghimi la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 3.27 alors que dans notre simulation elle atteint 2.8.

CAS D

IV.7.L'impact oblique

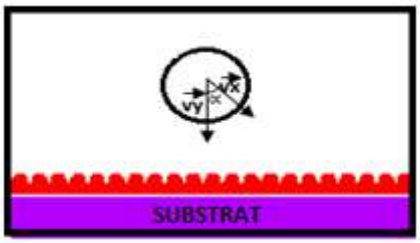


Figure IV. 7: Schéma représente l'impact oblique**.**

Dans ce cas nous avons proposé six angles déferrant (1°,3°, 5°,7°, 9°,11°) pour la goutte d'aluminium on donne la vitesse selon x et y, on fait la simulation numérique pour chaque cas et nous avons prend le résultat final a l'instants t=7s.

Pour $\propto = 1°$

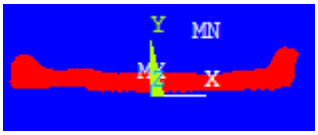


Figure IV. 8 : schéma représente l'étalement.

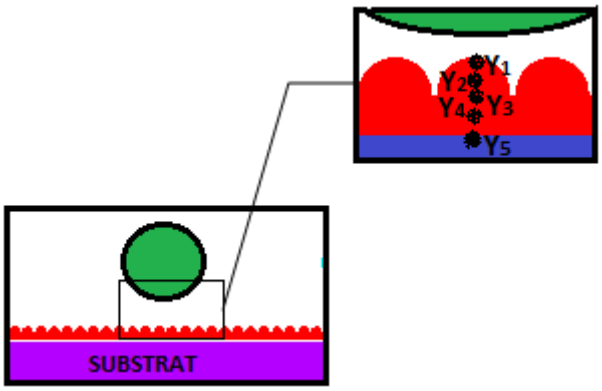


Figure IV. 9 : schéma représente les températures.

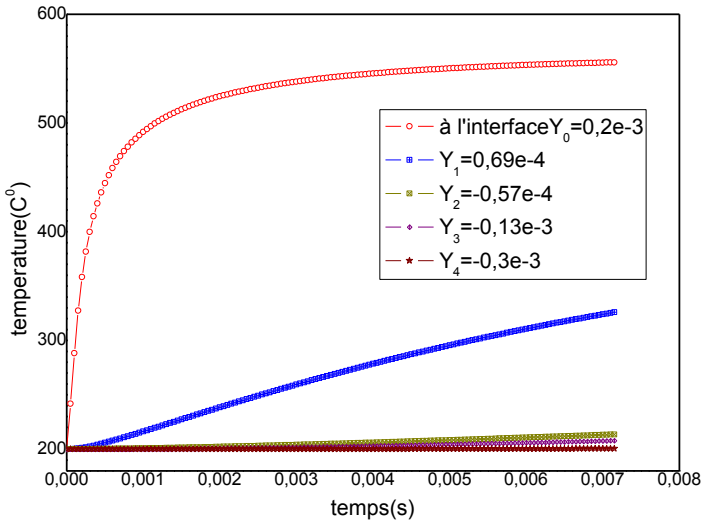


Figure IV.10 : profiles de température dans le temps pour cinq positions.

Cette courbe représente un comportement identique sur le substrat pendant le premier moment de l'impact, on note cependant que dans un second temps un comportement relativement similaire dans l'allure de variation, et on note que les valeurs des températures pour le point de contact sont plus élevées, mais les valeurs des températures des points au-dessous dans substrat diminuées. On peut constater aussi que, aux tous premiers instants

suivants le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement et la résistance thermique diminue. Après un étalement partiel, la surface de contact entre le substrat et la goutte augmente, alors que la température du substrat reste quasi-constante. La température de substrat augmente beaucoup plus lentement alors que la température de surface de la goutte s'abaisse ; donc la résistance de contact associée augmente, qui favorise la diffusion thermique radiale dans la lamelle. On note aussi que la zone d'infecté diminué par rapport a la vitesse d'évacuation de la chaleur.

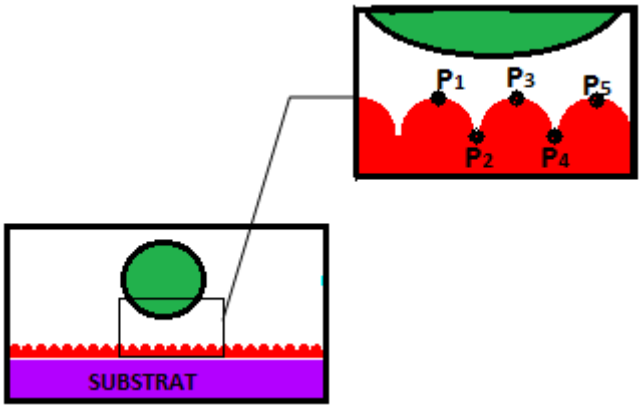


Figure IV. 11 : schéma représente les pressions.

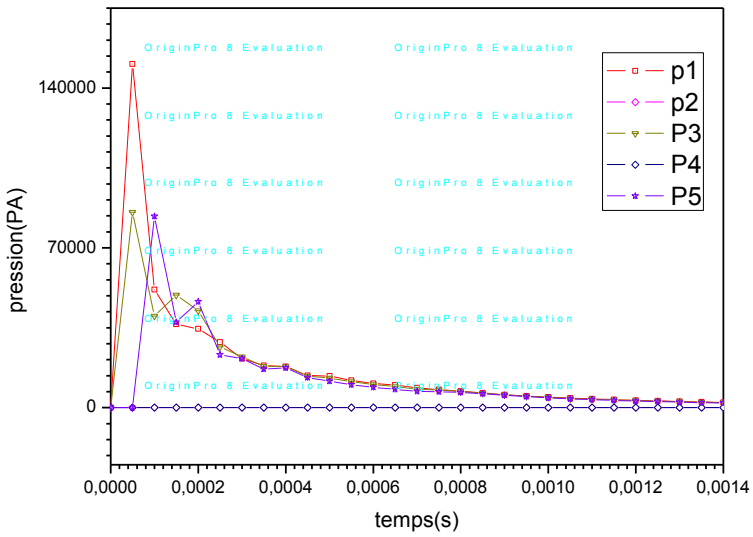


Figure IV.12 : la variation de la pression d'impact pour trois point à l'interface particule / substrat.

Illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (150 KPa), où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique

de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, l'augmentation de pression à l'impact dans point (p_1) est plus grande que celle dans les points (p_3 , p_5), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ce cas est bonne que dans les deux autres cas, (P_2 ,p_4) et la pression est toujours nul ce qui explique le non accrochage mécanique.

Pour∝= 11°

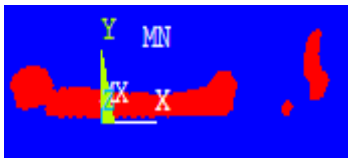


Figure IV.13 : schéma représente l'éclaboussement.

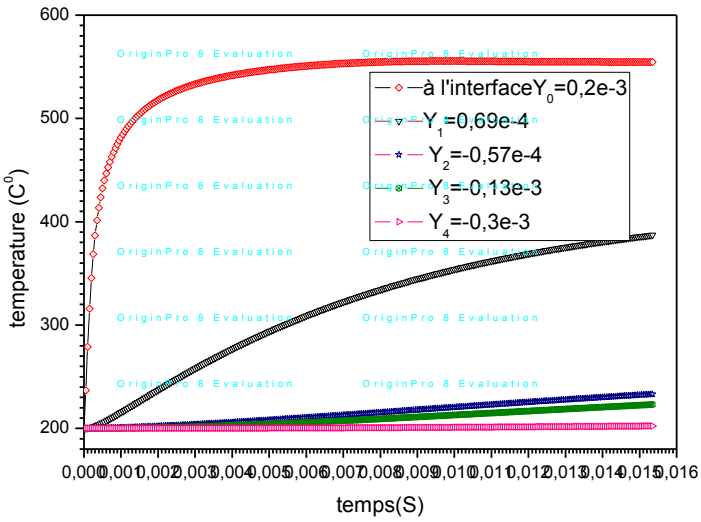


Figure IV.14 : profiles de température dans le temps pour cinq positions.

Le figure IV.14, montrent l'apparition des zones de bon et de mauvais contact a l'interface particule/substrat ce qui favorise le transfert de chaleur transversal vers le substrat et nom pas radialement dans la lamelle cela explique la température quasi-constante en profondeur du substrat.

On peut constater aussi que, aux premiers instants suivants le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement. Puis suite à un étalement partiel, la température de substrat augmente beaucoup plus lentement alors que celle de la surface de la goutte s'abaisse ceci et expliqué par un transfert de chaleur

goutte/substrat, donc la résistance de contact associée augmente. On note aussi que la zone infecté thermiquement dans le substrat augmente et par conséquent la vitesse d'évacuation de la chaleur.

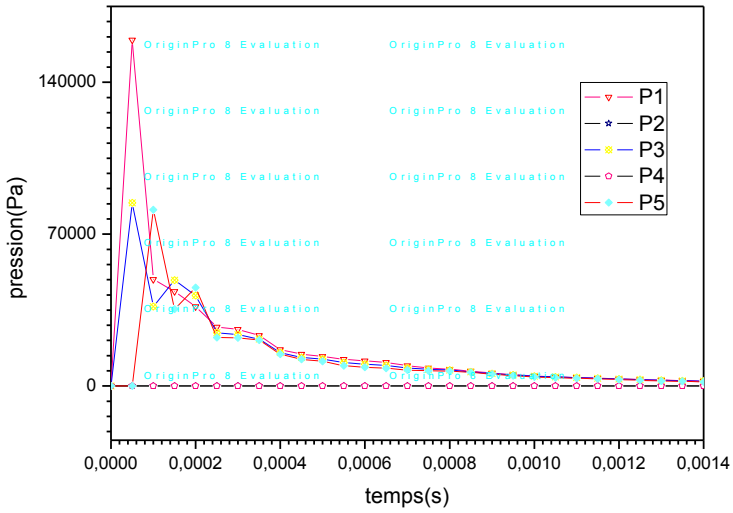


Figure IV.15 : la variation de la pression d'impact pour trois point à l'interface particule / substrat.

Illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (150 KPa), où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, l'augmentation de pression à l'impact dans point (p_1) est plus grande que celle dans les points (p_3 , p_5), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ce cas est bonne que dans les deux autres cas, (P_2 ,p_4) et la pression est toujours nul ce qui explique le non accrochage mécanique.

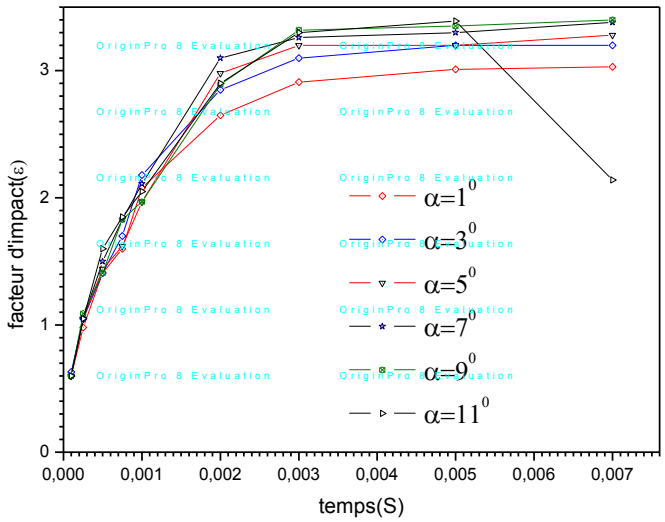


Figure IV. 16 : Facteur d'étalement (pour l'impact oblique)

L'étalement de la goutte oblique est le même au cours de l'impact jusqu'à l'instant t=2ms , ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radial très grande, après l'instant t=3ms la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement final dans tous les cas , sauf le cas de l'angle $\alpha=11^0$ qu'il diminue rapidement a cause de l'éclaboussement on peut voir clairement l'effet de transfert de chaleur dans la particule et la solidification avec un front transversal .

Conclusion

Un dépôt réalisé par projection thermique résulte d'un empilement successif de lamelles individuelles qui constituent l'élément fondamental de la construction du dépôt.

Cette partie du travail expose donc l'influence de l'impact oblique de la goutte sur la formation des lamelles.

- La forme de la gouttelette d'aluminium joue un rôle sur l'étalement de la lamelle est que nous avons adapté le meilleur étalement dans la forme normale.
- L'angle d'impact est d'une importance cruciale dans la formation des lamelles.
- Pour des angles d'impact variant entre 1°et 9° on peut voir qu'il y un bon étalement.
- Dans l'angle 11° on voie qu'il y un éclaboussement et si on augmente l'angle d'impact 13° par exemple on peut voir qu'il y un glissement.

Conclusion générale

L'étalement des gouttelettes métalliques ou céramiques sur un substrat en vu de la fabrication d'un revêtement fin et un procédé industriel largement utilisé.

Dans ce travail, notre objectif était d'étudier les phénomènes revêtement par projection plasma d'un dépôt d'aluminium ainsi que leurs propriétés reliées à l'impact oblique de goutte, également la solidification rapide d'une lamelle sur un substrat et l'étalement de goutte sur un substrat présentant des pics cylindrique.

les résultats obtenus montrent que :

- L'état de surface de substrat (rugosité) joue un rôle important sur la morphologie finale de la lamelle, l'énergie cinétique initiale est convertie plus rapidement en énergie de surface et en travail de forces visqueuses, lorsque l'énergie interne initiale est basse.
- La pression au point d'impact augmente rapidement dés le contact goutte substrat puis elle tend vers zéro au cours de l'étalement (pression de la goutte faible).
- Le préchauffage de substrat retarde la solidification et diminue l'éclaboussure.
- La forme de la gouttelette d'aluminium joue un rôle sur l'étalement de la lamelle est que nous avons adapté le meilleur étalement dans la forme normale.
- L'angle d'impact est d'une importance cruciale dans la formation des lamelles.
- Pour des angles d'impact variant antre 1°et 9° une lamelle est formée ; justifiant une bonne interaction particule substrat et donc la propagation perpendiculaire au substrat du front de solidification.
- Pour un angle 11° on voie qu'il y un éclaboussement et si on augmente l'angle d'impact 13° par exemple on peut voir qu'il y un glissement.

REFERANCE

[1] Ahmed K, McCallum D, Sheldon DF, Multiphase micro-drop interaction in inkjet printing of 3D structures for tactile maps, Modern Physics Letters B. (2005), volume 19, issue 28-29, pp. 1699-1702.

[2] A. MCWILLIAMS, High-performance ceramic coatings: Markets and Technologies, Business Communications Company Inc.-BCC research, 2007.

[3] Bolleddula D, Berchielli A, and Aliseda A, Impact of a heterogeneous liquid droplet on a dry surface: Application to the pharmaceutical industry, Advances in Colloid and Interface Science, (2010), volume 159, pp. 144-159.

[4] Dykhuizen R.C, Review of impact and solidification of molten thermal spray droplets. Journal of Thermal Spray Technology, (1994), volume 3, issue 4, pp. 351-361.

[5] Fauchais P, Fukumoto M, Vardelle A, and Vardelle M, Knowledge concerning splat formation, Journal of Thermal spray Technology, (2004), volume 13, issue 3, pp. 337-360

[6] Fauchais P, Vardelle A, Dussoubs B, Quo Vadis Thermal Spray, Journal of Thermal Spray Technology, (2001), volume 10, issue 1, pp. 44-66.

[7] Wang Z, Kulkarni A, Deshpande S, Nakamura T, and Herman, H, Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings, Acta Materialia, (2003), volume 51, issue 18, pp. 5319-5334.

[8] Fukumoto M, Shiiba M, Dependence of Thermal Sprayed Particle/substrate Interface Microstructure on Substrate Temperature, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, (2003), pp. 1047-1052.

[9] Bianchi L, Denoirjean A, Blein F and Fauchais P, Microstructural investigation of plasma-sprayed ceramic splats, Thin Solid Films, (1997), volume 299, pp. 125-135.

[10] Roberts K, and Clyne T, A simple procedure for the characterization of spray deposition processes - The linescan test, Surface and Coatings Technology, (1990), volume 41, pp. 103-115.

[11] Madejski J, Solidification of Droplets on a Cold Surface, Int J. Heat Mass, (1976), volume 19, pp. 1009 -1013.

[12] Pasandideh-Fard M, Chandra S and Mostaghimi J, A three-dimensional model of droplet impact and solidification, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2002), volume 45, pp. 2229-2242.

[13] Bussmann M, Chandra S, and Mostaghimi J, Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface. Physics of Fluids, (2000), volume 12, pp. 3121-3132.

[14] Fukumoto M, and al, Investigation of dominating factors on flattening behaviour of plasma sprayed ceramic particles. Surface and Coatings Technology, (1999), volume 120–121, pp. 124–130.

[15] Heichal Y, Chandra S, Mostaghimi J, Measuring thermal contact resistance between molten aluminum droplets and a steel plate. Proceedings of the International Thermal Spray Conference, (2005)

[16] Worthington AM, on the form assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate, Proc.R.Soc.Lond, (1876), volume 25, pp. 261-271.

[17] Leger AC, Vardelle M, Vardelle A, Fauchais P, Sampath S, and al, Plasma sprayed zirconia: Relationships between particles parameters, splat formation and deposit generation. Part I: Impact and solidification, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, (1996)

[18] Yarin AL, Drop impact dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing…, Annu Rev Fluid Mech, (2006), volume 38, pp 159-192.

[19] Dong H, Carr Wallace W, Morris JF, Visualisation of drop on demand inkjet: drop formation and deposition, Review of Scientific Instruments, (2006), volume 77, 085101

[20] A.Proner .Revétements par projection thermique ;techniques de l'Ingénieur M1645.1999

[21] E. Harscoet and D. Froelich, "Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA)", J. Clean. Prod., 16(12), p 1294-1305,2007

[22] http://www.tcpp.fr/html/projectionthermique.htm

[23] http://www.advanced-coating.com/projection-flamme.htm

[24] S. Nourouzi, thèse doctorat : « Contribution à l'étude du procédé Arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive », Université de Limoges, 2004.

[25] A. Prôner, Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur, Vol. (MD3), 1645(1999), 1-20

[26] bouhla ismail,saidani aboubaker : simulation numérique de l'impact des gouttelettes creuse d'aluminium sur un surface d'acier 2014

[27] P. Fauchais, Understanding plasma spraying, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, p 86-108, (2004)

[28] M. Khalid FATAOUI : Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique.Modèle mécano thermique de l'étalement de la gouttelette l'Université CHOUAIB DOUKKALI le 2007.Les References 84

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

[30] 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

[31] 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.

[32] S. Sampath, X. Y. Jiang, J. Matejicek, A. C. Leger, A. Vardelle Substrate Temperature Effects on Splat Formation, Microstructure Development and Properties of Plasma Sprayed Coatings. Part I: Case Study for Partially Stabilized Zirconia. Materials Science and Engineering A, 272, 1999, pp.181-188.
[33]C. Mundo, M. Sommerfeld, C. Tropea Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process. International Journal of Multiphase Flow, 21 (2), 1995, pp.151- 173.
[34] E. Nogues-Delbos Densification de dépôts de zircone yttriée projetés par plasma d'arc Ar-H2 et N2-H2 pour leur utilisation dans l'industrie des semi-conducteurs. Thèse de Doctorat d'Université, Université de Limoges, 2007, 218 p.
[35] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron, P. Fauchais Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation. Proceedings of th 2004 International Thermal Spray Conference, Osaka, Japon, 10-12 mai 2004, (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD-ROM, 6p.
[36] A. Vardelle, C. Moreau, P. Fauchais, Deposit formation dynamics, MRS Bulletin,2000, July, pp 32-37.
[37] 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
[38] C. Escure, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Visualization of the impact of drops on substrate in plasma spraying: Deposition and splashing mode, in Thermal Spray 2001: New surfaces for new millennium, (ed.) C. C. Brendt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp 805-812.
[39] Syed Asif Ansar, Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc; thèse de doctorat de l'université de limoges
[40] M. Vardelle, A. Vardelle, A. C. Leger, P Fauchais, D. Gobin, Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes, J. Thermal SprayTechnology, 4 (1), 1994, pp 50-58.
[41]S. Sampath, X.Y. Jiang, J. Matejicek, A.C. Leger, A. Vardelle, Substrate temperature effects on splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings Part I: Case study for partially stabilized zirconia, Material Science and Engineering A, 272, 1999, pp 181-188.
[42] C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, Influence of Substrate preparation on the flattening and cooling of plasma-sprayed particles, J. Thermal Spray Technology, 4 (1), 1995, pp 25-33.
[43] E. W. Collings, A. J. Markworth, J. K. McCoy, J. H. Saunders, Splat-quench solidification of freely falling liquid-metal drops by impact on a planar substrate, J. Material Science, 25, 1990, pp 3677-3682.
[44] M. Fukumoto, E. Nishioka, T. Matsubara, Effect of interface wetting on flattening of freely fallen metal droplet onto flat substrate surface, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied
[45]Research, (ed.) C.C. Brendt, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2000, pp 759-765.

[46] J. Madjeski Solidification of Droplets on a Cold Surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp.1009-1013.

[47, 48, 49,107] l'étude de l'influence de l'oxydation des substrats sur la formation de lamelle pour un dépôt d'aluminium. université Dr YAHIA FARES de Medea.2014-2015

[50] D. Bernard, P. Fauchais Influence of the Torch-Substrate Relative Movements and Cooling of the Coatings during Spraying on the Mechanical Properties of TBCs. Thermal Spray Research and Applications, (Ed.) F. Bernecki, (Pub.) ASM International, pp.551-560.

[51] C. J. Li, Y. He, A. Ohmori Characterization of Structure of Thermally Sprayed Coating. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Nice, France, 25-29 Mai 1998, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM international, Ohio, USA, pp.717-722.

[52] A. J. Allen, J. Ilavsky, G. G. Long, J. S. Wallace, C. C. Ber Berndt, H. Herman Microstructural Characterization of Yttria Stabilized Zirconia Plasma-Sprayed Deposits using Multiple Small-Angle Neutron Scattering. Acta Materialia, 49, 2001, pp.1661-1675.

[53] 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.

[54] 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

[55] 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

[56] M. Mellali, Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma, thèse de l'Université de limoges, 1994.

[57] G. Espié, P. Fauchais, Study of the in-Flight Oxidation of Iron Particles during the APSEffect of Dissolved Oxygen on the Wetting onto Ceramic Substrates, Advanced Materials and Processes, Ed. 99, 1999, pp423-429

[58] Gilles Espié, Oxydation de particules de fer dans un plasma d'arc Ar-H2, influence sur les propriétés du dépôt, Thèse de doctorat, Procèdes Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, 2000, pp8-11 et pp80-84

[59] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, B. Hannoyer, J.C. Labbe, P. Fauchais, Oxidation at Different Stages in Stainless Steel Coatings Developed by Air Plasma Spraying on Plain Carbon Steel, Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Spray, July 2002, Strasbourg, France, Begel House.

[60] A. Vardelle, P. Fauchais, N.J. Themelis, Oxidation of Metal Droplets in Plasma Sprays: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C. Coddet and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp175-180.

[61] A. Harir, Contribution a la faisabilité de dépôts composites métal-lubrifiant solide élabores par plasma d'arc, Thèse de l'Université de Limoges, 2002

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

[63] H. Llewellyn, P.S. Grant, A.P. Newbery, R.M. Jordan, Development of an Electric Arc Sprayed Self Lubricating Coating: Meeting the Challenges of the 21et Century, (Ed.) C. Coddet,(Pub.)ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp263-268

[64] L. Bianchi Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques : mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts, Thèse del'Université de limoges, 1995

[65] Y. Tanaka, M. Fukumoto, Investigation of Dominating Factors on Flattening Behavior of Plasma Sprayed Ceramic Particles, Surface and Coatings Technology, 120-121, 1999, pp124-130

[66] G. Jandin, H. Liao, Z.Q. Feng, C. Coddet, Correlations Between Operating Condition, Microstructure and Mechanical Properties of Twin Wire Arc Sprayed Steel Coating, Materials Science Engineering, A00 , 2002, pp1-8

[67] H.L. de Villiers Lovelock, Power/ Processing/ Structure Relationships in WC-CO Thermal Spray Coatings: a Review of the Published Literature, Thermal Spray Technology, Vol. 7 (No.3),1998, pp357-373

[68] C.K. Lin, C.C. Bendt, Measurement and Analysis of Adhesion Strength for Thermally Sprayed Coating, Thermal Spray Technology, Vol. 3 (No.1), 1994, pp75-104

[69] J. Comy, Treatment and Analysis of Adhesive Bonding, Thermal Spray Technology, Vol. 10 (No.3), 1990, pp161-165

[70] 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

[71] P Charles Howes, Processing, Preparation, Coating and Applications, Welding, 73, 1991, pp47-51

[72] S. Amada, H. Yamada, Introduction of Fractal Dimension to Adhesive Strength Evaluation of Plasma Sprayed Coating, Surface and Coating of Technology, 78, 1993, pp50-55

[73] M.P. Planche, R. Bolot, C. Coddet, In-Flight Characteristics of Plasma Spraye Alumina Particles: Measurements, Modeling, and Comparison, Thermal Spray Technology, Vol. 12 (No.1), 2003, pp101-111

[74] P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, L. Bianchi, A.C. Leger, Parameters Controlling the Generation and Properties of Plasma Sprayed Zirconia Coating, Plasma Chem. Plasma Proc., Vol. 16 (No.1), 1996, pp99-126

[75] S. Tobe, A Review on Protection From Corrosion, Oxidation and Hot Corrosion by Thermal Spray Coatings: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp3-

[76] R.C. Tucker, An Overview of Alternative Coatings for Wear and Corrosiopn Resistance: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp103-107

[77] J. Ilavky, J. Pisacka, P. Chraska, N. Margandant, S. Siegmann, W.Wagner, P. Fiala, G. Barbezat, Microstructure-Wear and Corrosion Relationships for Thermally Sprayed Metallic Deposits: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp449-454

[78] T. Tajiri, Z. Zeng, Microstructure and Corrosion Behavior of Arc Sprayed Stainless Steel Coating: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp697-703

[79] M.R. Dorfman, J.A. Debarro, Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C. Coddet and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp567-572

[80] T. Suzuki, K. Ishikawa, Y. Kitamura, Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp1033-1038

[81] S. Simard, B. Arsenault, Influence of Thermal Spray Process on the Corrosion Behavior of High-Density 316 Stainless Steel Coatings in Simulated Marine Environment: Advancing the Science and Applying the Technology, (Ed.) B.R. Marple, C. Moreau, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2003), pp323-327

[82] 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.

[83] : E. Benetto,«Analyse du cycle de vie - Réalisation de l'inventaire», Techniques de l'ingénieur, Réf G5510, 2005

[84] APPROCHE BIPHASIQUE DU CHANGEMENT DE PHASE AVECINTERACTION LIQUIDE-SOLIDE CEMEF, Ecole des Mines de Paris, B.P. 207, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France,

[85] F .Ben ettouil(2008) " Modélisation raide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc " thèse de doctorat a Université de Limoges.

[86] H. Makhlouf (2008) " Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers " thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de paris.

[87] F. Ben Ettouil, B. Pateyron, H Ageorges, M.El Ganaoui, P. Fauchais, O.Mazhorova Fast modeling of pahse change in a particle injected within a.d.c.plasma jet J. thermal Spray technology, 16,2007,744-750.

[88] V.R.Voller. (1990)Fast implicit finite difference method for the analysis of phase change problems.IMA Journal of Numerical Analysis, 30:875-898.

[89] TOUMI Aboubaker, BOUDERRADJI Mohamed « L'effet de la surface intermétalliquen de SnAgCu sur la fiabilité d'un ensemble de relie semi-conducteur de puissance » diplômen d'ingénieure ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2009.

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

[91] MAKHLOUFI Med Amine ; BOUDERRADJI Mohamed « Analyse par simulation numérique de l'influence des formes complexes sur l'apparition des défauts aux cours de remplissage des moules en 2D » diplôme de Master ; Université de Yahia Farés de Médéa ;2013

[92] DOUMA Mohamed Amine « la simulation numérique de remplissage du moule par la méthode MEF/VOF » diplôme de Master ; Université de Yahia Farés de Médéa ; 2013.

[93] YKRELEF Hichem « Etude de la distribution des défauts du remplissage des moules par simulation numérique » diplôme de Magister ; Université de Yahia Farés de Médéa ; 2011.

[94] PFENDER E., FINCKE J., SPORES R. Entrainment of cold gas into thermal plasma jets, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1991, 11, 4, p. 529-543.

[95] PATEYRON B., DELLUC G., ELCHINGER M.F., FAUCHAIS P. Study of the Behaviour of the heat conductivity and transport properties of a single reacting system: H2-air and H2-air-Ar. Dilution effect in spraying process at atmospheric pressure, J. of High Temperature Chem. Proc., 1992, 1, 3, p. 325-332.

[96] PECH J. Préoxydation générée par jet de plasma d'arc soufflé. Relation entre surface, oxydation et adhérence de dépôts. Thèse de doctorat d'université. Rouen. Université de Rouen, 1999, 174 p.

[97] Hervé OUDIN « Méthode des éléments finis » centrale Nantes ; 2008.

[98] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron and P. Fauchais "Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation", Thermal Spray Solutions, Advances in technology and application, Osaka, Japan. ISBN 3-87155-792-7, 2004

[99] Manual of Ansys ver 11, Ansys.inc, USA

[100] PFENDER E., FINCKE J., SPORES R. Entrainment of cold gas into thermalnplasma jets, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1991, 11, 4, p. 529-543.

[101] PATEYRON B., DELLUC G., ELCHINGER M.F., FAUCHAIS P. Study of the,Behaviour of the heat conductivity and transport properties of a single reacting system: H2-air and H2-air-Ar. Dilution effect in spraying process at atmospheric pressure, J. of High Temperature Chem. Proc., 1992, 1, 3, p. 325-332.
[102] PECH J. Préoxydation générée par jet de plasma d'arc soufflé. Relation entre surface, oxydation et adhérence de dépôts. Thèse de doctorat d'université. Rouen. Université de Rouen, 1999, 174 p.
[103] Hervé OUDIN « Méthode des éléments finis » centrale Nantes ; 2008.
[104] CARREROT. H."Etude du comportement mécanique de dépôt céramique projeté par plasma pour application orthopédiques", Thèse de l'Ecole des mines de Saint Etienne, 1991
[105] Manual of Ansys ver 11, Ansys.inc, USA
[106]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)
[108]Etude numérique des phénomènes thermiques contrôlant la solidification d'une lamelle en projection thermique : Application à la formation de dépôt .université limoges(2008)
[109] Modeling the impact of a molten metal droplet on a solid surface using variable interfacial thermal contact Javad Mostagimi 2007