REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université Yahia FARES de MÉDÉA

Projet fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master

En Génie Mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

THEME

ETUDE NEMURIQUE DE L'INFLUENCE DE PRESENCE DES PICS SURFASIQUE DE SUBSTRAT D'ACIER SUR L'INTERACTION THERMIQUE ET DYNAMIQUE DE L'IMPACT

Présentée par :

- benchaouane hadjira
- hamma samira

Proposé et dirigé par :

- Dr ZIRARI Mounir
- djeghjough Mohamed

Promotion 2014/2015

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je rends grâce à ALLAH, le tout puissant qui m'a offert La santé,

La volonté et surtout la patience pour accomplir ce travail.

J'adresse mes chaleureux remerciements à Mr : ZIRARI MONIR pour m'avoir

Faciliter mon travail, pour son aide, sa disponibilité, sa patience et ses conseils

Judicieux, c'est une chance inouïe d'avoir eu l'occasion de travailler sous sa

Direction.

Sans oubluer touts les profs des énergitique et thermique de système.



DEDCACE

JE dédie ce travail :

A la mémoire de mon père qui s'est
Sacrifiée et qui a souhaite vive long temps
Juste pour me voir heureuse et réussie.
A celle qui m'as transmis la vie, l'amour
Le courage, a toi chère mère
Toutes mes joies, mon amour, et
Reconnaissances.
Je ne serais exprimer ma gratitude
Seulement par des mots, que dieu les
Protège et les garde.
A mes frères, A mes sœurs.
A toutes les membres de ma famille Hamma et chettouf,
..A mes amies
A touts mes collègues de la promotion2014-2015.
A toutes les personnes m'ayant aide de prés
Ou de loin trouvent ici l'expression de
Ma reconnaissance.

Samira



DEDCACE

À la source de tendresse, de générosité de bonheur,

à celle qui a consacré sa vie Pour que je réussisse dans

tout ce que j'entretiens, à toi ma très chère mère,

À Qui je souhaite une longue vie.

À mon très cher père. Pour l'affection dont tu

me comble, pour ta patience, ton Optimisme

, ta tolérance, ta présence régulière et constante à tout Instant.

À mes très chères frères fares et moussa.

À mes très chères sœurs ,

sans oublier mes oncles, mes cousines et mes cousins.

Je remercie mes amies , pour leur encouragement

À tout mes collègues de la promotion 2014/2015.

Enfin À toute personne qui a contribué de prés

ou de loin à la réalisation De ce modeste travail.

hadjira

Résume

Dans ce mémoire on à étudié nemurique par la méthode EF/VOF, l'impact et l'étalement de gouttelette d'aluminium sur substrat d'acier, présentant une topographie surfacique sous forme de pics cylindrique, ainsi la méthode de chaleur spécifique équivalente est utilisé pour le contrôle de solidification. L'analyse des expériences numérique montre un bon accord entre le modèle utilisé et les résultats expérimentaux et d'autre part la présence des pics favorise l'accrochage mécanique et l'étalement avec l'inconvénient de l'arrachement au niveau de l'inter-pics et pour des grands diamètres de pics.

Mots clés :

Impact, étalement, solidification, VOF, substrat, pics cylindrique, simulation, éléments finie, CFD.

Abstracts

In this thesis we studied to digital by the EF / VOF method, the impact and aluminum droplet spreading on steel substrate having a surface topography as cylindrical spikes, and the equivalent specific heat method used for solidification control. The analysis of numerical experiments shows good agreement between the model used and the experimental results and secondly the presence of peaks promotes mechanical attachment and spreading with the inconvenience of tearing at the inter -peak and for larger diameters peaks.

Keywords:

Impact, spreading, solidification, VOF, substrate, cylindrical spikes, simulation, finite elements, CFD.

ملخص

في هذه الأطروحة درسنا إلى النظام الرقمي من قبل EF / طريقة VOF، وتأثير والألمنيوم قطرة تنتشر على الركيزة الفولاذ وجود تضاريس سطح باعتباره المسامير أسطواني، ويعادل طريقة حرارة محددة تستخدم للسيطرة على التصلب. ويظهر تحليل التجارب العددية اتفاق جيد بين النموذج المستخدم والنتائج التجريبية وثانيا وجود قمم يعزز مرفق الميكانيكية ونشر مع إزعاج من تمزق في بين pics- وأكبر أقطار القمم.

الكلمات الأساسية:

الأثر، نشر، التصلب، VOF، الركيزة، والمسامير أسطواني، والمحاكاة، العناصر المحدودة،CFD

Sommaire

Introduction générale……1

Chapitre I : Etude bibliographique

I .1 .La projection thermique …….3

I.2. Technique de projection thermique…….3

I.2.1. Traitement à la flamme……..5

I.2. 1.1.La projection flamme –poudre …….....5

I.2. 1.2.La projection flamme-fil ……....5

I.2. 1.3.Projection supersonique par combustion……5

I.2. 1.4. le canon à détonation……..6

I.2. 2. La projection par arc électrique……..6

I.2. 2.1. La projection arc-fil……..6

I.2. 3 .la projection plasma…….....7

I.2.3.1. Principe……..7

I.2.3.2. fonctionnement de la torche à plasma d'arc……..8

I.2.3.2.1. Amorçage de l'arc…….....10

I.2.3.2.2.Le gaz plasmagène……...…...11

I.2.3.2. 3. Injection des gaz…….……..12

I. 3. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat……...13

I.3.1. Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat……...14

I. 3.2. Etalement de la particule…….14

I.3.3. Solidification des lamelles…….....17

I.4. Caractéristiques microstructurales des revêtements……...18

I.4.1. Dépôts d'alumine…….19

I.5. Substrat……...20

I.5.1. Préparation de substrat…….20

I.5.2. Construction du dépôt…….....21

I.5.3. Phénomènes d'oxydation ……22

I.5.3.1. Oxydation des gouttelettes en vol…….22

I.5.3.2. Oxydation lors de la formation du dépôt……..23

I.6. Caractéristiques du dépôt……24

I.6.1. Microstructure…….....25

I.6.2. Teneur en oxydes et porosité……26

I.6.3. Adhérence et dureté…….26
I.6.4. Resistance …….....26
I.7.conclusion……....26

Chapitre II : Modélisation mathématique

II.1. Introduction ……..27
II.2. Modélisation de L'écoulement des Fluides……..27
II.2.1. Equation de Navier-Stokes……27
II.2.2. Equation de continuité…….....27
II.2.3. La décomposition statique (La décomposition de Reynolds)……27
II.2.4. Les équation des mouvements moyennes …….28
II.2.4.1. Équation de continuité de mouvement moyen……28
II.2.4.2. Équation de Navier-stocks moyenne…….....28
II.2.4.3. Equation de transport des tensions de Reynolds……29
II.2.4.4. Équation de l'énergie cinétique fluctuante [8]: $K=\frac{1}{2}R_{ij}$……..30
II.2.4.5. Équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique fluctuante ……30
II.2.5. Problème de fermeture des équations……31
II.2.6. Quelques hypothèses classiques de la fermeture de turbulence ……31
II.2.6.1. Hypothèse de chou……..31
II.2.6.2.Hypothèse de viscosité turbulente de bousines……31
II.2.6.3.hypothèse de longueur de mélange de Prandtl…….31
II.2.6.4. Hypothèse de Prandtl-Kolmogorov ……32
II.2.7. Les modèles de turbulence et leurs classifications……32
II.2.7.1.Les modèles à viscosité turbulence algébrique (modèle à zér équation de transports)…….....32
II.2.7.2. Les modèles à une équation de transport…….32
II.2.7.3. le modèle k-$\boldsymbol{\varepsilon}$ et RNG (modèle a deux équations de transport)……..32
II.2.7.4. Le modèle k-$\boldsymbol{\varepsilon}$ deux couches…….....32
II.2.7.5. Le modèle k-$\boldsymbol{\varepsilon}$ étendu …….32
II.2.7.6. Modèle Algébrique aux tensions de Reynolds (ASM)……..…....34
II.3. Modélisation du transfert de chaleur…….36
II.3.1. Equation d'énergie…….....36
II.3.2.Transferts de chaleur en écoulements incompressibles…….....36
II.4.Méthode de VoF……37

II.4.1.Idée fondatrice ……37
II.4.2.Equation sur le taux de présence……37
II.4.3.Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle……..37
II.4.4.Equation de conservation de la quantité de mouvement ……..38
II.4.5.Tension interfaciale ……38
II.4.6.Angle de contact……..……...38
II.4.7.Prise en compte dans le modèle VOF ……39
II.5. Conclusion ……..40

Chapitre III : Modélisation numérique

III.1.Introduction ……..41
III.2.Les méthodes numérique……..41
III.2.1.méthode des différences finies…….....41
III.2.2.méthode des éléments finis……..……41
III.2.3.méthode des volumes finis…….41
III.3. Résolution des équations par éléments finis…….41
III.3.1Introduction Méthodes des éléments finis…….....41
III.3.2. Misse en œuvre de la méthode des éléments finis……...41
III.3.2.1. Formation variation elle forte……...43
III.3.2.2 formation vibrationnelle faible …….....43
III.3.3.forme générale des équations du système [10]…….....44
III.4.choix d'un maillage ……..……44
III.4 .1.discrétisation ……45
III.4.1.1.Terme temporelle……...46
III.4.1.2. terme d'advection…….....46
III.4.1.2.1. monotone streamline upwind approach (MSU)…….....46
III.4.1.2.3.approche colloquée de galerkin(COLG) ……48
III.4.1.3.terme de diffusion……..48
III.4.1.4. termes source ……48
III.5.2.forme discrétisée ……...50
III.5.2.1.représentation élementaire (ou locale) du champ de températures…….50
III.5.2.2.représentation globale du champ de température……51
III.5.3. discrétisation de la forme intégrale …….51
III.5.4. example de calcul élémentaire ……51
III.6.Conclusion ……..53

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 ANSYS…….....54
IV.1 .1.Les points forts des outils ANSYS sont ……..54
IV.1 .2.Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux ……..54
IV.1 .3.Schéma de logiciel ANSYS……...…..54
IV.2 Description du domaine d'application ……56
IV.3 Matériaux utilisés ……..(56)
IV.3.1 l'aluminium ……..57
IV.3.2 propriétés des particules à l'impact ……..57
IV.4 impact d'une particule d'aluminium totalement fondus…….....59
IV.4.1. pic surfacique de diamètre (D=1.2 10^{-3}mm)……61
IV.4.1.1 : pic surfacique de diamètre (D=0.8 10^{-3}mm)…….64
IV.4.1.1 pic surfacique de diamètre (D=0.6 10^{-3}mm)……..66
IV.5 comparaisons des résultats…….....67
IV.6 Conclusion ……...73

LISTE DE GIGURE

FigureI. 1. Epaisseurs de dépôts e température de substrat en fonction de la technique utilisée [2]…….…....3
FigureI. 2. Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [4]……..…..4
FigureI. 3. Schéma de principe d'un pistolet flamme [6] ……..……..4
Figure I.4: Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes Fonctionnels [7]……..7
Figure I.5 : Principe de formation de dépôt par projection plasma [7]…….....8
Figure I.6 : Ordre des échelles de temps lors de la formation du dépôt par projection [7] 9
Figure I.7 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [6,9] ……..…….10
Figure I.8 : Conductivité thermique des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculée avec T1TWinner [6,11]……11
Figure I.9 : Enthalpies massiques des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculées avec T1TWinner [11] ……11
Figure I.10 : Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma[6]…….……13
Figure I.11 : Modes d'impact [15]……..……...…..14
Figure I.12 : Schéma d'écrasement de la particule [20] ……..…….15
Figure I.13 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma [31].....18
Figure I.14 : Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) du dépôt d'alumine élaboré à 573 K [20]. ….....19
Figure I.15 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique [39]…….…….21
Figure I.16 : Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette [41]……..….....22
Figure I-17a : écrasement de particules sur des aspérités……...…….....23
Figure I-17b : processus du dépôt……..……..24
Figure III-1 (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique……..…….....45
Figure III-2 :l'approche de ligne de courant d'upwind……..…….....47
Figure III-3 bilan thermique……...……..49
Figure III- 4 : domaine plain discrétise en 12 élément reliés entre eux par 15 ...…….50
Figure III-5 élément a deux nœuds ……...……...52
Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS…….55

Figure IV.2 : **2** impact séquentiel d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 2.9m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C le temps d'étalement t=7m……59
Figure IV 3 : facteurs d'étalement……60
figure IV.4: distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat diamètre 1.2 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s……61
Figure IV.5 facteur d'étalement des deux cas ……..62
Figure IV.6 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les Deux position des diamètres 1.2 10^{-3}mm…….62
Figure IV.7 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 1.2 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des pics totalement fondue…….63
Figure IV.8 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 1.2 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule substrat totalement fondue…….63
figure IV.9 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat diamètre 1.2 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s.....64
Figure IV.10 facteur d étalement des deux cas…… ..65
Figure IV.11: Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux position des diamètres 0.8 10^{-3}mm…….65
Figure IV.12 : profiles de température dans le temps pour trois positions diamètres 0.8 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des bics totalement fondue…….66
Figure IV.13 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 0.8 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des substrats totalement fondue……66
Figure IV.14 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat diamètre 0.6 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s……67
Figure IV.15 comparaison entre le facteur d'étalement des deux cas ……....68
Figure IV.16 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux positions des diamètres 0.6 10^{-3}mm……68
Figure IV.17 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 0.6 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des bic totalement fondue. ……....69
Figure IV.18: profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 0.6 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des substrats totalement fondue…….69

Figure IV.19: distribution de la température lors de l'impact d'une goutte D'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur substrat avec des pics de diamètre 1.2 10^{-3} et 0.8 10^{-3}et0.6 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s……70
Figure IV.20: Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux positions des trois déférentes diamètres …….....71
Figure IV.21 facteurs d'impacte dans chaque forme pour les trois cas……72

Liste de tableau

Tableau II.1 : la décomposition de Reynolds dans les équations de Navier Stokes…….....31
Tableau II.2 : constantes du modèle k-…….....33
Tableau II. 3 : constantes du modèle RNG…….....34
Tableau II.4 : constant du modèle USM……..35
Tableau III.1 : expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différancesvariables…….....44
Tableau IV.1 : propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. [65].....58
Tableaux IV.2 : impact séquentiel d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 2.9m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C….59
tableaux IV.3 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat diamètre (1.2 10^{-3} et 0.8 10^{-3} et 0.6 10^{-3}) à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s…….....68

Nomenclature

Lettres latines

Notation	Signification	Unité
a	Diffusivité thermique	[m².ŝ$^{-1}$]
Cp	Capacité calorifique massique à pression constante	[m².ŝ$^{-2}$. ŋ$^{-1}$]
D	Diamètre de goutte	[m]
ň$_{Ŗ}$	Distance entre deux gouttes voisines	[m]
ň$_{ŗ}$	Diamètre initial de goutte	[m]
’n$_{œ}$	Energie cinétique	[N.m]
’n$_{ŝ}$	Energie potentielle	[N.m]
ŕ$_{ŝ}$	Fraction solide	
Ŋ$_{Ŝ}$	Nombre de Fourier thermique	
g	Accélération de pesanteur	[m. ŝ$^{-2}$]
h	Hauteur de goutte	[m]
H	Enthalpie	[J]
K	Nombre de Sommerfeld	
m	Masse	[Kg]
Oh	Nombre d’Ohnesorge	
Ō$_{œ}$	Nombre de Peclet	
Ō$_{Ŝ}$	Nombre de Prandtl	
r	rayon de goutte	[m]
ō $_{Œ}$	Nombre de Rayleigh	
ō $_{Ŕ}$	Nombre de Reynolds	
ō $_{õŇ}$	Résistance thermique de contact	[K.m².ő$^{-1}$]
Ŏ$_{œ}$	Terme source ou puits changement de phase	[W. Ř$^{-3}$]

Ste	Nombre de Stefan	
T	Température	[°K]
T	Temps	[s]
Ş$_{ŗ}$	Composante de la vitesse instantanée suivant i	[m. ŝ$^{-1}$]
V	Volume	[Ř^{3}]
Ő$_{ŗ}$	Vitesse d'impact	[m. ŝ$^{-1}$]
Ş$_{SRŕ}$	Vitesse de refroidissement en DSC	[K. Řŗř$^{-1}$]
ő$_{R}$	Nombre de Weber	
Š$_{ŗ}$	Coordonnée cartésienne suivant la direction i,x,y,z	[m]
z	Altitude	[m]

Lettres grecques

š	Fraction cristalline	
Ţ	Coefficient de compressibilité	[ŋ$^{-1}$]
ţ	Angle de contact	[°]
Ť	Conductivité thermique	[W. Ř$^{-1}$. ŋ$^{-1}$]
Φi	Fonction de présence des fluides	
σ	Tension superficielle	[N. Ř$^{-1}$]
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
	Variable généralisée	
Ň	Coefficient d'advection transitoire	
Γ	Coefficient de diffusion	
ρ	masse volumique	[kg.Ř$^{-3}$]

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

La technologie de projection thermique est une solution éprouvée et reconnue pour des applications mécaniques, thermiques, anti-usure, anti -corrosion et de génie électrique les plus diverses. Bien que d'application courante depuis trente ans dans les domaines aéronautique et spatial ainsi que nucléaire, elle n'est présente que maintenant dans le secteur de l'automobile, des textiles, de la chimie, de la pétrochimie, de l'électronique et du biomédical.

La projection thermique est un procédé dans lequel les matériaux solides sont chauffés chimiquement (combustion) ou électriquement par des arcs électrique ou par des jets de gaz chauffées par des arcs, ensuite accélères par les jets de gaz créant des aérosols fondus se déplaçant à des grandes vitesses. Ces aérosols sont diriges sur la surface cible ou les particules fondus individuelles viennent s'écraser, se refroidissent et se solidifient pour former un revêtement protecteur.

La réalisation de revêtement par pulvérisation de fines gouttelettes sur la surface à recouvrir est un sujet à de plus en plus de recherches. Afin de comprendre la morphologie de l'impacte de la goutte sur le substrat il est intéressent d'examiner les phénomènes dynamiques et thermiques à l'échelle de ces gouttes qui vont créer la fine couche.

Cependant ces couches ne sont pas toujours formées de manière parfaite des défauts de dépôt tels que les fissures peuvent être par fois observés.

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact dynamique et l'étalement couplé au refroidissement avec solidification, pour se faire nous avons choisi des particules en aluminium totalement fondues impactant sur un substrat Ayant une forme de pic surfaciques cylindrique de diamétre1.2 10^{-3} mm, 0.810^{-3}mm et 0.610^{-3}mm).

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 nous avons présenté les résultats de la simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact de gouttes obtenus par le code de calcule ANSYS.

Notre travail se termine par une conclusion générale suivie d'une proposition des perspectives.

I.1.La projection thermique

Différentes technologies de dépôts permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer ses propriétés de surface [1]. Parmi les techniques les plus utilisées, on peut citer l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (notés respectivement PVD et CVD) et la projection thermique. Les applications de ces dépôts concernent essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de revêtements à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique, etc.) [2]. Différentes épaisseurs peuvent alors être obtenues en fonction de la techn

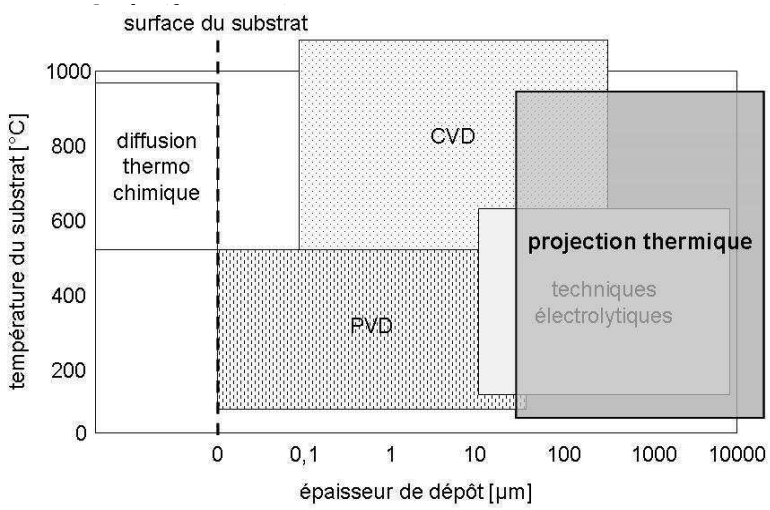


Figure I.1 Epaisseurs de dépôts e température de substrat en fonction de la technique utilisée [2]

I.2 .Technique de projection thermique

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 [3]. 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 [4]

Il serait donc intéressant de balayer les différentes techniques de projection thermique.

I.2.1 .Traitement à la flamme

Le procédé de projection par flamme [2, 4] est basé sur la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène. Dans la technologie dite flamme-poudre, le matériau est introduit sous forme de poudre dans la flamme diffusante qui le véhicule jusqu'au substrat (figure I.3). Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C, et donc les températures atteintes par les particules à projeter ne dépassent généralement pas 2000 °C.

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (~50 m/s). La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h sans échauffement important du substrat (T<250 °C). Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles (alliages à base Nickel ou Cobalt contenant des éléments de petite taille tels que le bore et/ ou le silicium et chargés éventuellement en carbures) ou encore les matériaux organiques.

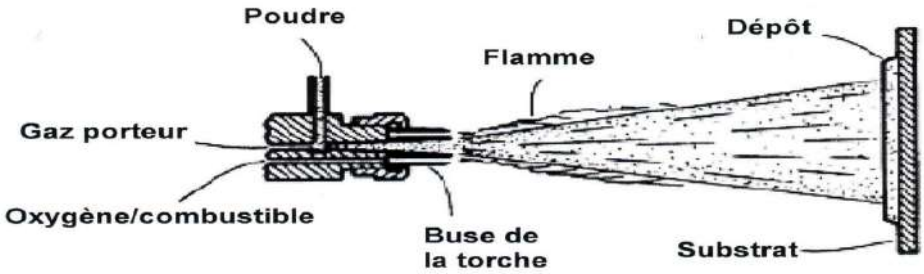


Figure* I.*3 : Schéma de principe d'un pistolet flamme [6]

Il existe également un procédé appelé « projection flamme-fil » où le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon. Il utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme-poudre (oxygène + gaz combustible) auxquels s'ajoutent de l'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée (environ 150 m/s). La température de l'extrémité du fil ou de la tige peut atteindre 0,95 fois la température de la flamme ce qui permet de projeter des céramiques. Les taux horaires varient de 1 kg/h à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, des diamètres de fil ou de baguette utilisés et des propriétés de dépôts recherchées.

I.2.1.1.La projection flamme –poudre

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

I.2.1.2.La projection flamme-fil

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

I.2. 1.3. Projection supersonique par combustion

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 m $.s^{-1}$) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée(0.5 à 1 MPa) la chambre de combustion est refroidie et les gaz s'évacuent par une tuyère convergent – divergent suivie d'un fut de quelques dizaines de centimètres destiné à limiter l'entrainement de l'air ambiant . La poudre est injectée dans la flamme, à l'aide d'un gaz neutre porteur, soit en amont (distribution à un supérieur à celle de la chambre de combustion) soit en aval (distribution au voisinage de la pression atmosphérique), on distingue deux procédés :

- **Le procédé HVOF :** High Vélocité OXY-fuel flamme, il utilise la combustion à l'oxygène d'un carburant gazeux tel que : propane, propylène, étrenne, méthane ou l'hydrogène ou liquide : généralement du kérosène
- **Le procédé HVAF :** High Vélocicité air –fuel flamme, la combustion est assurée par un mélange kérosène –air comprimé.

Dans les deux cas, la vitesse des particules sont comprimes entre 300 et 600 ms^{-1} ce qui permet en bon écrasement des particules dans un état plastique.

I.2. 1.4. Le canon à détonation

Le matériau d'apport, sous forme de poudre , et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits en même temps dans un tube (tube de détonation) fermé à une extrémité , grâce à une étincelle le mélange de gaz explose créant une onde de choc maintenue par la combustion ,l'évacuation du gaz brulé , l'introduction du gaz explosif frais ne permet de renouveler l'explosion que jusqu'à 8 fois par seconde ,les particules de poudres sont ainsi chauffées et éjectées à une grande vitesse (jusqu' à 1200m/s) par l'onde de choc crées qui se déplace à des vitesse pouvant atteindre 2900m.s^{-1}. Les d dépôts obtenus sont compacts (porosité inférieure à 1 %), de bonne adhérence (généralement supérieure à 80 MPa) et de faible rugosité (RA=□3μm) ,les taux de dépôt horaires sont compris entre 3 et 5 Kg.h^{-1} et l'épaisseur de dépôt est généralement inférieure à 0.2mm

Ce procédé des contraintes aux niveaux des installation (dimension, bruit de plus de 140 Db ,……..) ce qui réserver son utilisation à des sites spécialisés.

I.2.2. La projection par arc électrique

I.2.2.1. 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 [5] 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.

I.2. 3 .la projection plasma

I.2.3.1. Principe

Les premières torches plasma à courant continu (direct curent : d.c.) sont apparues dans les années 60 et les premières torches de projection au milieu de la décennie et enfin une décennie plus tard, la projection plasma sous vide partiel a été introduite. La robotisation du procédé a commencé dans les années 80 parallèlement au développement des torches radio fréquence (RF) pour la projection. Les travaux des années 90 ont été orientés vers le développement des détecteurs et outils de diagnostic susceptibles de résister à l'atmosphère agressive des cabines de projection, cette décennie a vu aussi l'émergence de nouvelles torches d.c. (injection axiale Mettech, torche de petite dimension et rotative pour la projection sur des surfaces cylindriques, torches à trois cathodes et tuyère segmentée : Triplex de Sultzer Metco) et des torches RF supersoniques. Enfin, au début de ce millénaire, les efforts portent sur l'amélioration de la fiabilité et de la reproductibilité du procédé via le développement des outils de contrôle en ligne (comportant des détecteurs de haute sensibilité) ainsi que l'élaboration de nouveaux procédés visant la réalisation de dépôts finement structurés sinon nanostructures [6,7]. En raison de ces évolutions et de la flexibilité de cette technique, de nombreuses industries ont recours à la projection plasma pour réaliser des dépôts généralement à haute valeur ajoutée, pour différentes applications comme les barrières thermiques, la résistance à l'usure, à la corrosion et/ou l'érosion, les applications électriques, les prothèses humaines … La projection plasma est aussi utilisée pour la restauration des pièces fonctionnelles usées ou endommagées.

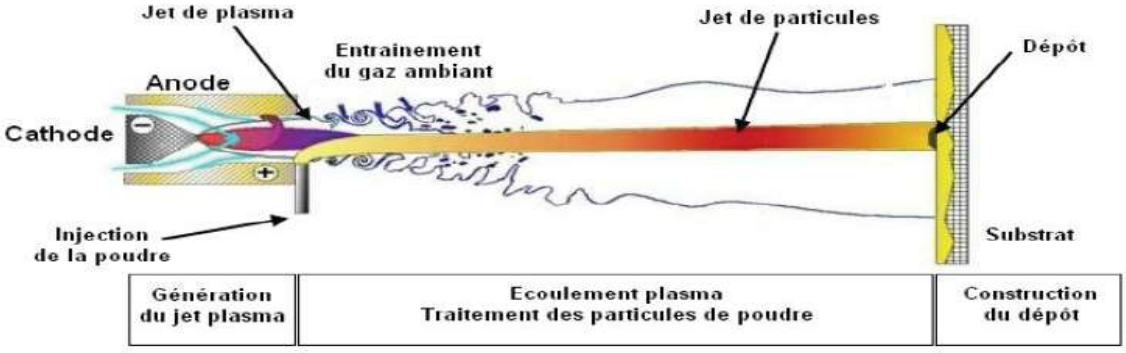


Figure I.4: Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes fonctionnels [7]

La maîtrise de la qualité d'un dépôt réalisé par projection plasma passe par celle des différentes fonctions du procédé par le truchement de la microstructure qui est le résultat des paramètres liés à la particule (taille, vitesse, température, état de fusion,…), au substrat (température, rugosité, chimie de surface,…) et à la torche (puissance, débit et composition des gaz plasmagènes, ...). La complexité du procédé de projection plasma résulte de l'ordre de grandeur des températures et des vitesses rencontrées ainsi que des temps caractéristiques extrêmement faibles qui en résultent, comme le montrent les Figure I.5 et Figure I.6. En effet, selon sa vitesse d'injection, le temps de séjour d'une particule dans le jet de plasma est compris entre 0,1 ms et quelques millisecondes. La Figure I-6 récapitule les temps caractéristiques de la projection plasma conventionnelle qui varient de la microseconde pour l'impact d'une particule à plusieurs secondes, voire plusieurs heures pour la construction du dépôt [7,8], selon la taille de la surface à traiter qui peut varier de quelques centimètres carrés à quelques dizaines de mètres carrés.

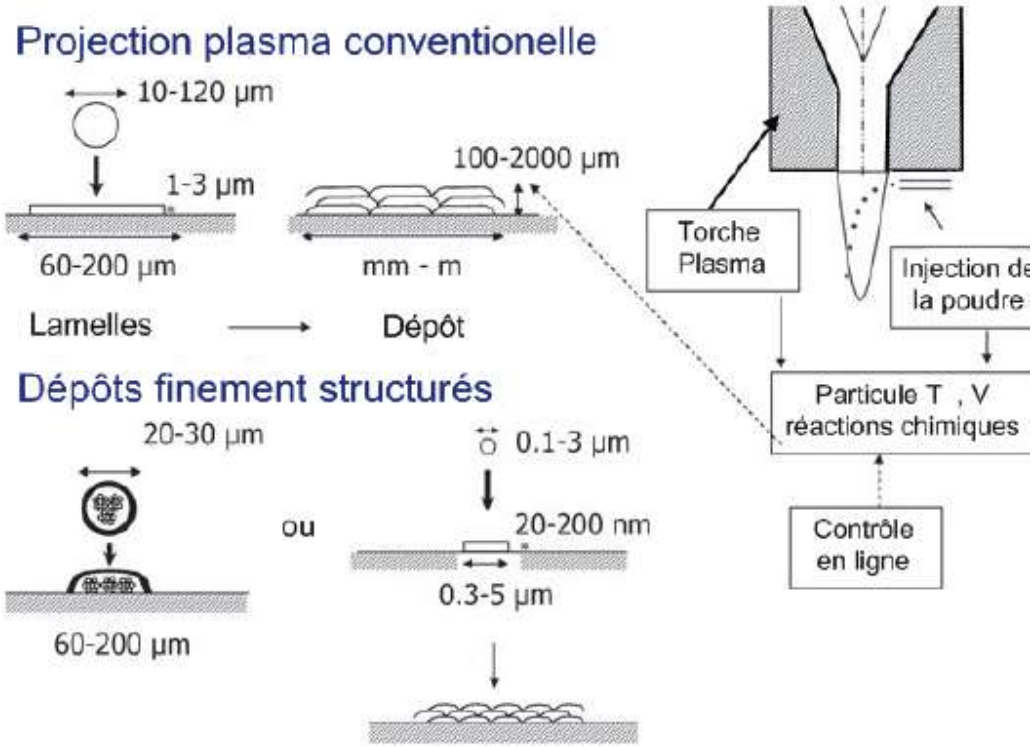


Figure I.5 : Principe de formation de dépôt par projection plasma [7]

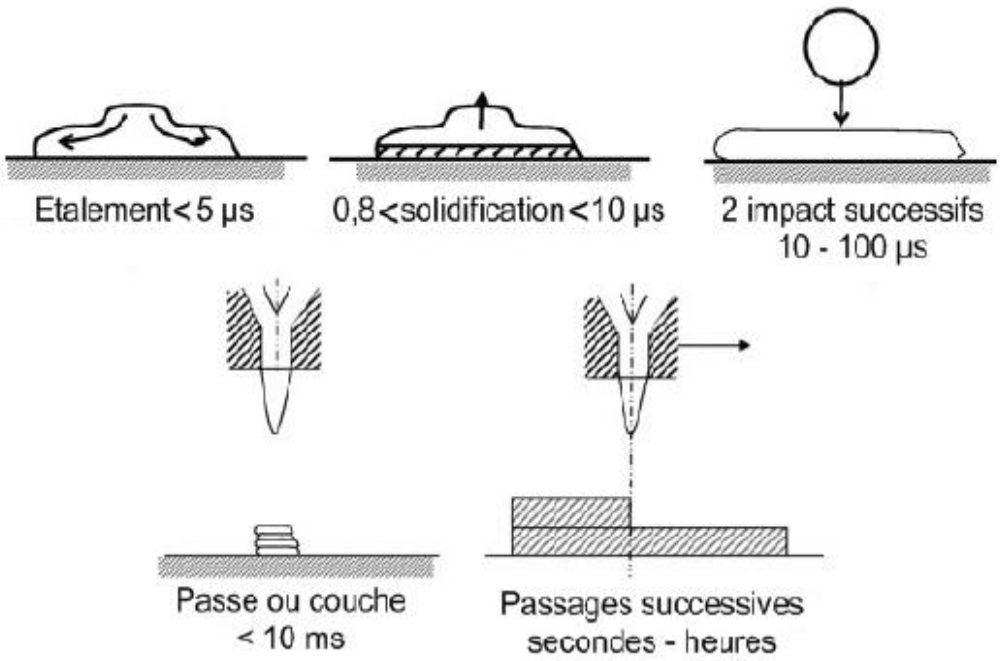


Figure I.6 : Ordre des échelles de temps lors de la formation du dépôt par projection [7]

I.2.3.2. 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 (Figure I.7) :

- **Torche à arc transféré :** l'arc jaillit entre une électrode interne et un corps conducteur, généralement le substrat
- **Torche à arc soufflé :** l'arc jaillit entre deux électrodes, une cathode et une anode tuyère, c'est celle que nous décrivons par la suite.

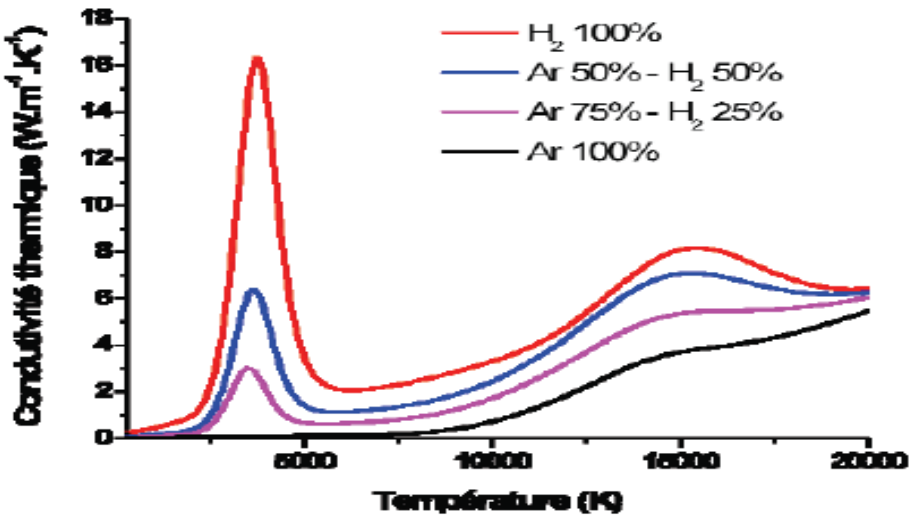


Figure I.7 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [6,9]

I.2.3.2.1. 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 [10]. 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 (N 2 , H 2 , He).

I.2.3.2.2.Le gaz plasmagène

L'argon est donc le gaz primaire le plus utilisé en projection plasma car il présente l'avantage d'être inerte [11]. Les propriétés thermo-physiques de l'hydrogène font de lui un gaz secondaire idéal pour augmenter l'enthalpie et la conductivité thermique du plasma sans pratiquement modifier sa température, ce qui permet d'améliorer le transfert thermique plasma-particules. La Figure I.8 montre, calculée avec le logiciel T1Twinner [6,11], l'effet de la teneur en hydrogène sur la conductivité du gaz plasmagène. Le pic vers 3500 K correspond à la dissociation de l'hydrogène et au-delà de 4000 K, la conductivité thermique intégrée du mélange, qui intervient dans le transfert plasma-particule, est multipliée par un facteur de 3 pour des teneurs d'hydrogène supérieures à 10 %.

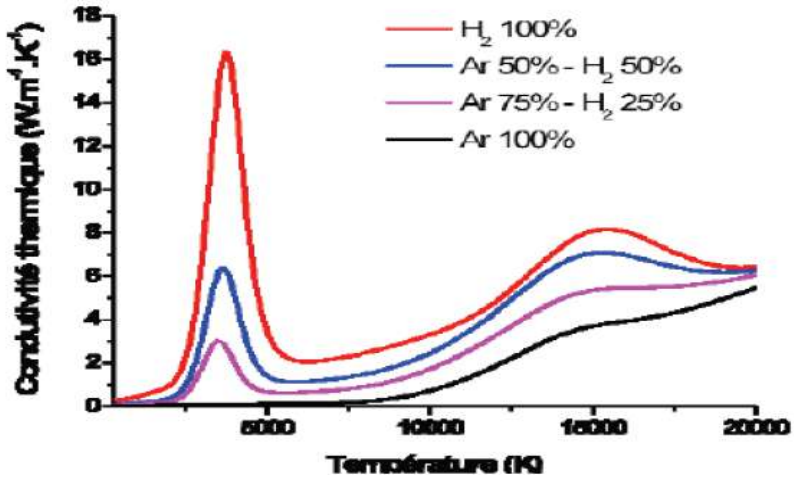


Figure I.8 : Conductivité thermique des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à Pression atmosphérique calculée avec T1TWinner [6,11]

La Figure I.9 illustre la variation avec la température de l'enthalpie massique des mêmes gaz, à pression atmosphérique. L'augmentation du pourcentage d'hydrogène est accompagnée d'une forte variation de l'enthalpie massique. En effet, l'hydrogène accroît, de façon plus conséquente que l'argon, le pouvoir calorifique du plasma car il se dissocie avant ionisation, ce qui augmente l'enthalpie du plasma. En outre la masse d'une mole d'hydrogène étant 20 fois plus faible que celle d'une mole d'argon, pour une même puissance dissipée, l'enthalpie d'une mole d'hydrogène est vingt fois plus élevée que celle de l'argon.

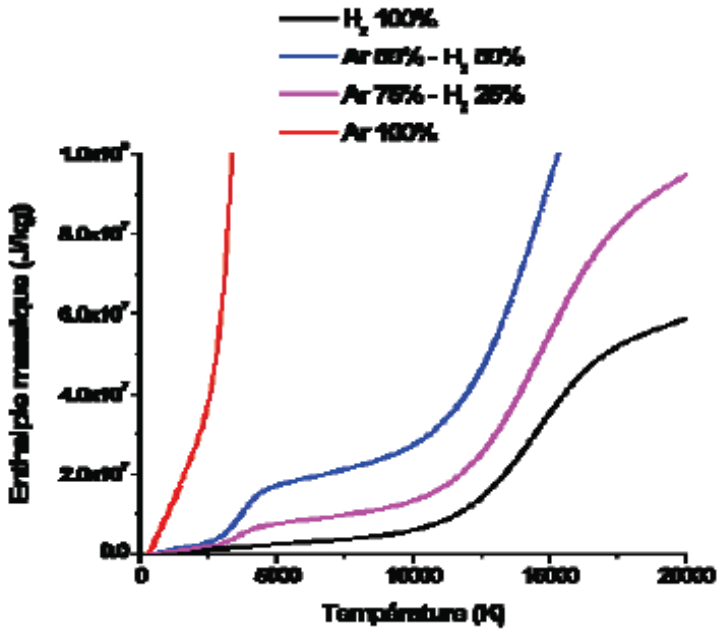


Figure I.9 : Enthalpies massiques des mélanges Ar-H 2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculées avec T1TWinner [11]

I.2.3.2. 3. Injection des gaz

Le mélange gazeux est injecté dans la torche au niveau de la cathode. Trois modes d'injection du gaz dans la chambre d'arc sont possibles (Figure I.10) :

- **Injection axiale :** la bague d'injection est percée de trous parallèles à l'axe de la cathode, les gaz ont donc une composante de vitesse longitudinale ;
- **Injection radiale :** la bague d'injection est percée de trous orthogonaux l'axe Longitudinal de la cathode, la vitesse présente au début une composante radiale importante qui s'atténue ensuite, mais beaucoup de turbulences sont générées au voisinage de la pointe de la cathode ;
- **Injection en vortex :** la bague d'injection est percée de trous dont l'axe présente un certain angle par rapport à l'axe longitudinal de la cathode, ce qui donne une composante de rotation à la vitesse du gaz plasmagène. L'intensité du vortex est mesurée à l'aide d'une grandeur appelé « vorticité » et notée « S » [1,12] qui présente le rapport de la quantité de mouvement angulaire sur la quantité de mouvement axiale. Elle est relativement faible avec ce type d'injection (S < 3).

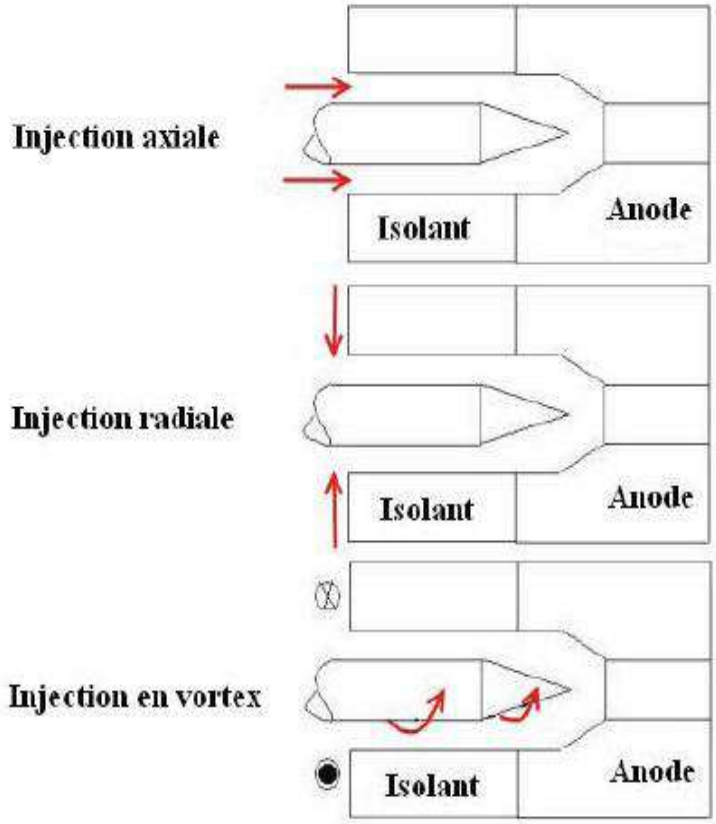


Figure I.10 : Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche De projection plasma [6]

I. 3. 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 **[13]**.

I.3.1. 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) **[14]** 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)

$$K = We^{0.5}.Re^{0.5} \quad \text{.....(I.1)}$$

Ou :

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

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

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

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

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)

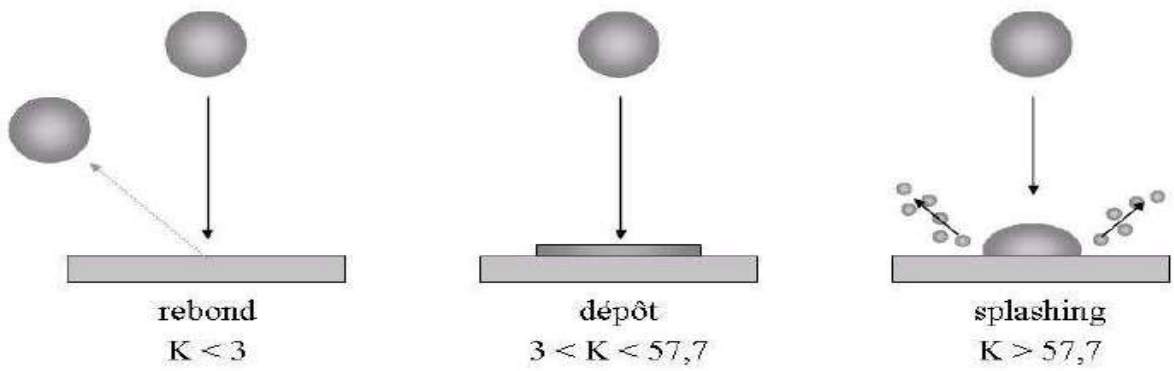


Figure I.11 : Modes d'impact **[15].**

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 **[16]**.

I. 3.2. 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.12). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement **[17, 18].**

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 $10<K<70$ **[19].** 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.

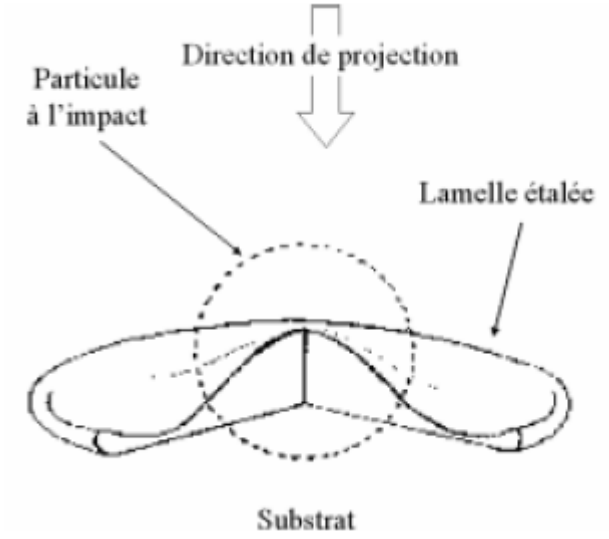


Figure I.12 : Schéma d'écrasement de la particule **[20]**.

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.…) **[20].**

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 **[21]**. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température **[22]**, de la rugosité **[23]** et des propriétés thermiques du substrat **[24]** sur l'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué **[25]**. 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)* **[26]** 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) :

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

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) **[27].**

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

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.3.3. Solidification des lamelles

Le refroidissement de la lamelle s'effectue essentiellement par conduction thermique à l'interface, il est donc conditionné par la qualité du contact entre la lamelle et le substrat (ou la couche de dépôt précédemment déposée). En effet, seule une fraction de la surface de la lamelle est en contact avec la couche inférieure (entre 20 et 30 %). L'interface est alors divisée en régions de bon contact thermique (contact direct lamelle-substrat) où le contact

peut être considéré parfait et mauvais contact thermique (présence d'oxydes, d'inclusions gazeuses).

Ainsi, l'interface est caractérisée par un coefficient global d'échange thermique ***h*** quantifiant les échanges thermiques avec la lamelle et influant directement sur la vitesse du refroidissement (comprise entre 108à 109 $K.s^{-1}$ pour de la zircone yttriée sur substrat poli (BIANCHI et AL, 1997)).

Selon RUHL 1968, les facteurs les plus importants, conditionnant le refroidissement sont la qualité du contact thermique ainsi que l'épaisseur de la lamelle. Ces influences sont traduites par le nombre de Biot.

$$B_i = \frac{h.e}{Ks} \qquad (I.7)$$

Où :

h : est le coefficient d'échange thermique à l'interface.

ep : l'épaisseur de la lamelle.

Ks : la conductivité thermique du substrat ou de la couche déjà formée

Le nombre de Biot permet, selon sa valeur, de classer le refroidissement de la lamelle en trois catégories :

- **Bi >30 :** le contact thermique est considéré parfait, la résistance thermique de contact est très faible (inférieure à $10-8m^2.K.W-1$), le refroidissement est qualifié d'idéal.
- **Bi <0,1 :** le transfert thermique à l'interface est limitant, la résistance thermique de contact est élevée (en général supérieure à $10-6m^2.K.W-1$) et le refroidissement de la lamelle est isotherme.
- **0,01< Bi <30 :** le refroidissement est qualifié d'intermédiaire.

La vitesse de refroidissement est comprise entre 4.108et 5.109 **[28]**.

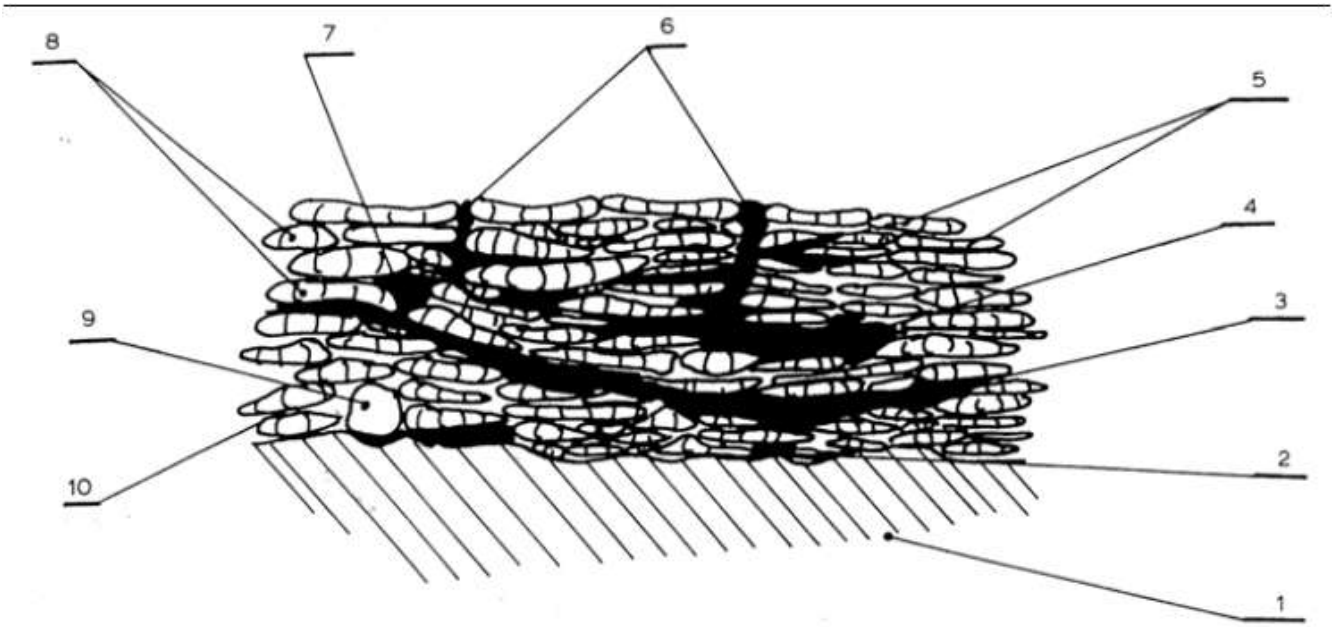
I.4. Caractéristiques microstructurales des revêtements

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 **[29]**.

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 (figure I.18). 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 **[30**, **31**, **32]** :

- 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.



1 : substrat ; 2 : défauts d'adhérence ; 3 : décohésion du dépôt due aux passes de la torche ; 4 : décohésion du dépôt due à la relaxation des contraintes résiduelles ; 5 : fissures au sein de lamelles ; 6 : fissures verticales résultant des contraintes résiduelles et porosité ouvert ; 7 : porosité fermée ; 8 : particules complètement fondues ; 9 : particules infondues ; 10 : mauvais contacts entre lamelles.

Figure I.13 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma **[31]**.

I.4.1. Dépôts d'alumine

Les figures I.14 a et b présentent, respectivement, les micrographies en coupe polie et après fracture des dépôts d'alumine élaborés à 573 K.

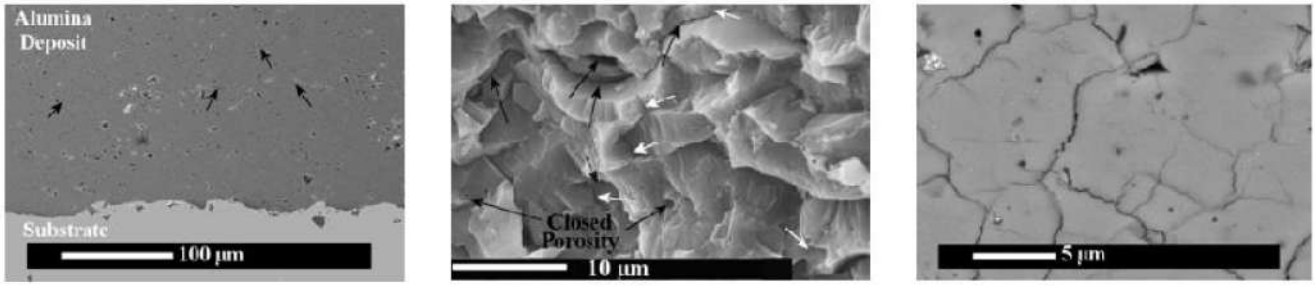


Figure I.14 : Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) du dépôt d'alumine élaboré à 573 K **[20]**.

Les défauts inter-lamellaires (flèches noires sur la figure I.14-a) et de la porosité peuvent être observés sur ces images. La figure I.14-b montre la structure lamellaire du dépôt d'alumine et la microstructure colonnaire des splats ainsi que les défauts intra-lamellaires (flèches blanches). Les micrographies de la surface polie du dépôt d'alumine (figure I.14-c) mettent en évidence la présence de porosité ainsi que des microfissures. Ces microfissures, liées aux contraintes de trempe, indiquent des contacts de bonne qualité entre les splats. Une structure similaire a été observée pour des dépôts d'alumine réalisés à 400 et 723K **[20]**.

I.5. 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 **[32, 33].**

I.5.1. 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 **[34, 35]** :

- 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.5.2. Construction du dépôt

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire **[36, 37]** comportant éventuellement des oxydes, des microporosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites (figure I.15). La manière dont les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité. Par ailleurs, la formation des lamelles peut s'accompagner d'un phénomène d'éclaboussure à l'impact et /ou à la fin de la phase d'étalement.

Les mécanismes d'étalement et de solidification des particules sont relativement complexes, car ils dépendent de l'énergie cinétique et thermique **[38]**. Le phénomène d'éclaboussure peut être réduit en diminuant la taille des gouttelettes et/ou leur vitesse d'impact en jouant sur le débit du gaz d'atomisation ou sur la géométrie des buses, des gouttelettes, de leur viscosité et de leur mouillabilité vis à vis du matériau substrat, de la nature et de l'état de surface du substrat ainsi que de sa température

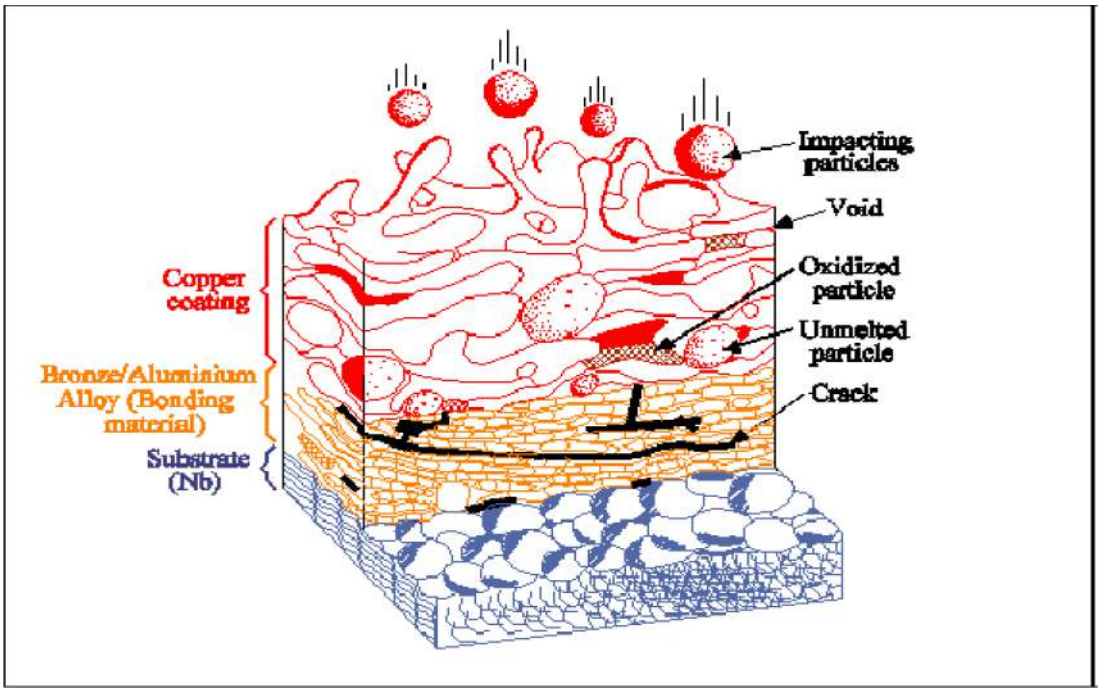


Figure I.15 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique **[39].**

I.5.3. Phénomènes d'oxydation

L'inclusion d'oxydes dans les dépôts tend généralement à 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.5.3.1. Oxydation des gouttelettes en vol

L'importance de l'oxydation des gouttelettes en vol dépend **[40, 41]** :

- 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'oxygène vers le coeur des particules.

La quantité d'oxygène 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 à la sortie de la tuyère.

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

1. La diffusion de l'oxygène 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.16).

Ces mouvements entrainent de l'oxygène 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 (Vgaz Vparticule >50) et pour un nombre de Reynolds de la particule supérieur à 20. Ce phénomène est donc favorisé par des vitesses de gaz d'atomisation élevées **[42, 43,44]**

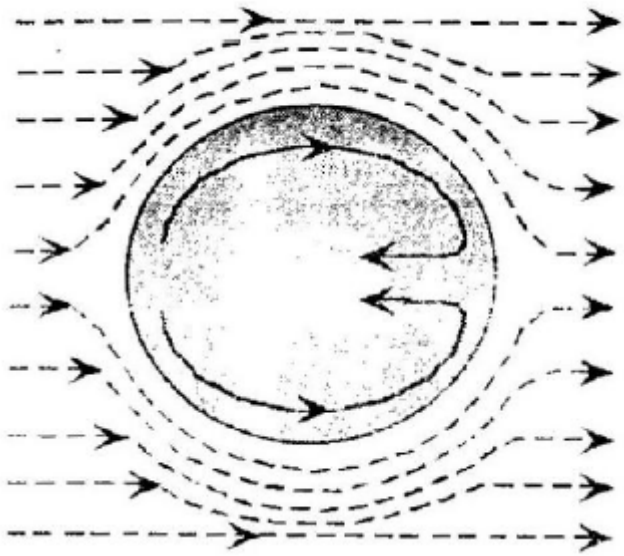


Figure I.16 : Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette **[41].**

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

I.5.3.2. Oxydation lors de la formation du dépôt

Il est possible de distinguer 2 types d'oxydation **[43]** :

1. L'oxydation des lamelles : elle est généralement peu importante car les lamelles ne sont soumises à 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 à 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 à 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 limité en projection arc-fil car la température du substrat dépasse rarement les 200 °C.

I.6. 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 .pour aidé a la compréhension.les schémas (figure I-17b) montrent les différent les différentes phase de projection.

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 [7 ,35] :

- la 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 (figure II-17a).

- **l'adhésion chimique :** ce type d'adhésion est observé dans le cas ou le substrat et le matériau projeté présentent une affinité chimique avec la formation d'un alliage ou d'un composé 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.

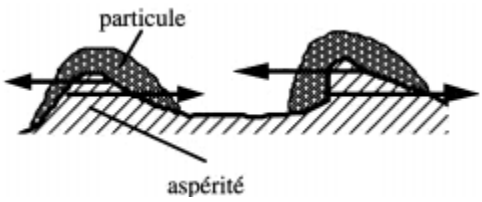


Figure II-17a : écrasement de particules sur des aspérités.

Âpres écrasement, l'énergie thermique contenue dans la particule est extraite par le substrat, d'où un refroidissement très rapide des particules de l'ordre de a 10^6k/s, ce refroidissement brutal induit des taille de grains très fins (moins de 1 μm) favorables aux propriétes micaniques, mais provoque l'apparition de phase métastables, voirvitreuse, par exemple pour l'alumine, il y a l'apparition de la phase y [7]

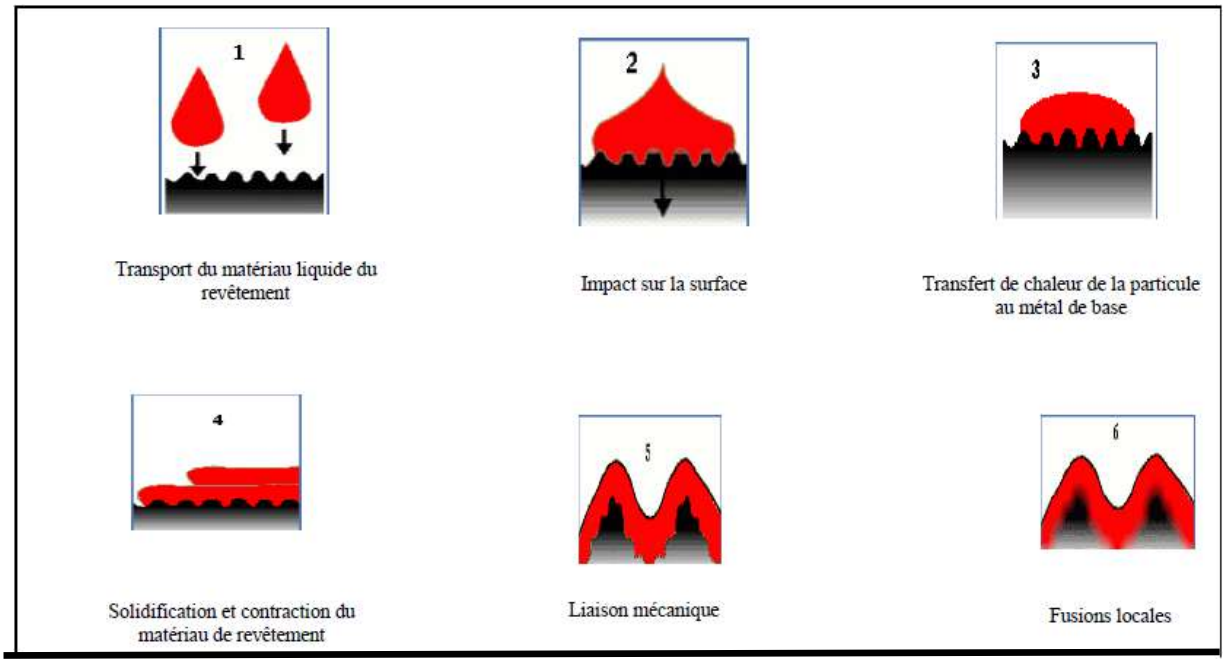


Figure I-17b : processus du dépôt

I.6.1. Microstructure

Les particules fondues s'écrasent sur le substrat où 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 à la dizaine de microsecondes **[44, 45]**.

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) **[46, 47]**.

I.6.2. 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 **[47, 48].**

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 **[49]**.

I.6.3. 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. **[50, 51]**. Cependant, dans le cas des dépôts élaborés par projection a l'arc, l'adhérence est générée essentiellement par trois types de liaisons **[52,53]** :

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 **[54, 55]**.

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 **[35, 56]**.

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 observé 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 **[52, 47]**.

I.6.4. 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 réalisés par projection thermique peuvent en particulier prémunir de la corrosion des structures en acier et en fer **[58]**.

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 **[59, 60]**.

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 **[61, 62]**.
- 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 à 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 **[63, 64]**.

I.7. conclusion

Dans ce chapitre Présente principale d'accrochage dans cette voie, propose numériquement le fait des pics surfacique cylindrique de substrat.

II.1. 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.2. Modélisation de L'écoulement des Fluides

tous les problèmes de CFD sont basés sur les lois fondamentales de mécanique des fluides ; qui sont :

II.2.1. Equation de Navier-Stokes

On considère l'écoulement de deux fluides incompressibles, newtoniens et non-miscibles.la dynamique de chaque phase K est déterminée par les équations de Navier- Stokes [5]:

$$\frac{d\rho kv}{dt} + \square(\rho k) = \rho kg - \square\rho k + \square(2\mu Ksk) \qquad \text{(II-1)}$$

II.2.2. Equation de continuité

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

$$\frac{\partial Ui}{\partial xi} = 0 \qquad \text{(II-2)}$$

II.2.3. La décomposition statique (La décomposition de Reynolds)

Elle consiste à décomposé chaque grandeur instantané φ des équations des Navier-Stokes en une grandeur moyenne $\bar{\varphi}$ et une fluctuation turbulente φ'.

Les équations de Navier -Stokes étant non linéaires, l'opération de moyenne fait apparaître de nouveaux termes qui traduisent l'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen.

$$\varphi = \bar{\varphi} \varphi' \qquad \text{(II-3)}$$

Avec la valeur moyenne de φ est exprimée par la relation suivante :

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{T} \int_0^1 \varphi \, dt \qquad \text{(II-3-a)}$$

Dans le cadre de la modélisation en un point de la turbulence, on ne s'intéresse qu'aux Moyennes statiques de la vitesse et de la pression. On décomposé ainsi les grandeurs

II.1. 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.2. Modélisation de L'écoulement des Fluides

tous les problèmes de CFD sont basés sur les lois fondamentales de mécanique des fluides ; qui sont :

II.2.1. Equation de Navier-Stokes

On considère l'écoulement de deux fluides incompressibles, newtoniens et non-miscibles.la dynamique de chaque phase K est déterminée par les équations de Navier- Stokes [5]:

$$\frac{d\rho kv}{dt} + \square(\rho k) = \rho kg - \square\rho k + \square(2\mu Ksk) \qquad \text{(II-1)}$$

II.2.2. Equation de continuité

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

$$\frac{\partial Ui}{\partial xi} = 0 \qquad \text{(II-2)}$$

II.2.3. La décomposition statique (La décomposition de Reynolds)

Elle consiste à décomposé chaque grandeur instantané φ des équations des Navier-Stokes en une grandeur moyenne $\bar{\varphi}$ et une fluctuation turbulente φ'.

Les équations de Navier -Stokes étant non linéaires, l'opération de moyenne fait apparaître de nouveaux termes qui traduisent l'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen.

$$\varphi = \bar{\varphi} \varphi' \qquad \text{(II-3)}$$

Avec la valeur moyenne de φ est exprimée par la relation suivante :

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{T} \int_0^1 \varphi \, dt \qquad \text{(II-3-a)}$$

Dans le cadre de la modélisation en un point de la turbulence, on ne s'intéresse qu'aux Moyennes statiques de la vitesse et de la pression. On décomposé ainsi les grandeurs

Instantanées selon la règle de Reynolds :

$$Ui = \bar{U} + Ui \quad \text{(II-4)}$$

$$p = \bar{p} + p$$

II.2.4. Les équation des mouvements moyennes

II.2.4.1. Équation de continuité de mouvement moyen

L'équation de continuité du champ moyen est obtenue par moyenne de l'équation [3]:

$$\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xi} + \frac{\partial Ui}{\partial xi} = 0 \quad \text{(II-5)}$$

II.2.4.2. Équation de Navier-stocks moyenne

Toutes les opérations de l'équation (II-1) sont linéaires à l'exception de celui du terme

D'advection donc on obtient immédiatement l'équation moyenne suivante [3]:

$$\frac{\partial \bar{U}i}{\partial t} + \overline{Uj}\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xj} + \bar{U}j\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xj} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial xi} + V\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial xj \partial xj} \quad \text{(II-6)}$$

Après avoir introduise la décomposition de Reynolds on écrit finalement :

$$\frac{\partial \bar{U}i}{\partial t} + \overline{Uj}\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xj} + \bar{U}j\frac{\partial \bar{U}i}{\partial xj} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial xi} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial xj \partial xj}\ (\overline{\tau ij} + R_{IJ}) \quad \text{(II-7)}$$

L'effet de la moyenne engendre bien entendu une perte d'information, caractérisée ici

Par l'apparition d'une corrélation inconnue $\overline{U_L}\ U_J$ appelé tenseur de Reynolds.

La condition d'incompressibilité implique :

$$Ui\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial xj} = \frac{\partial \overline{UiUj}}{\partial xj} \quad \text{(II-8)}$$

Les tensions de Reynolds ou les contraintes de Reynolds $\overline{U_L}\ U_j$ peuvent être s'écrit sous la

Forme suivante :

$$[R_{ij}] = -\rho\begin{pmatrix} \overline{UU} & VU & UW \\ UV & VV & VW \\ UW & VW & WW \end{pmatrix} \quad \text{(II-9)}$$

Où $[\tau ij]$ est le tenseur des contraintes visqueuse, défini par :

$$[\tau ij] = T\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi} \quad \text{(II-9-a)}$$

Avec :

$$\frac{\partial \tau ij}{\partial xij} = T\frac{\partial^2 \overline{Uj}}{\partial xi \partial xi}\left(\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right) \quad \text{(II-9-b)}$$

II.2.4.3. Equation de transport des tensions de Reynolds

Les équations de transport sont de la forme générale [6] : $R_{ij}=\overline{u_j u_l}$

$\frac{d\varphi}{dt}$ Production+ diffusion –dissipation+sources additionnelles

Ou $\frac{d}{dt}$: représente la dérivée particulaire (rappelons que $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} + Ui\frac{d\varphi}{dxj}$

Les équations de départ sont les équations (II.1) et (II.2) dans lesquelles on a Introduit l'équation (II.3) et (II.4). On part de l'équation de [6]

$$\frac{\partial(\bar{U}_i+U_i)}{\partial t} + (\overline{U_K} + U_K)\frac{\partial(\bar{U}_i+U_i)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\bar{p}_i+p)}{\partial x_i} + V\frac{\partial^2(\bar{U}_i+U_i)}{\partial x_j \partial x_j} \quad \text{(II-10)}$$

On fait la différence (II.11)-(II.7) en tendent compte de (II.8):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{U}_K\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + u_k\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial(u_i u_k - \bar{u}_k\bar{u}_i)}{\partial x} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + V\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} \quad \text{(II-11)}$$

On peut écrire (II.12) pour l'indice j :

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \bar{U}_K\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + u_k\frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \frac{\partial(u_j u_k - \bar{u}_k\bar{u}_j)}{\partial x_k} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_j} + V\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_k} \quad \text{(II-12)}$$

On multiple (II-12) par et U_j (II-13) par U_i et on somme les deux équations obtenus. En Regroupant certains termes, il vient [6]:

$$\frac{\partial Uj}{\partial t} + U_K\frac{\partial Rij}{\partial xk} = -R_{ik}\frac{\partial Uj}{\partial xk} - R_{ij}\frac{\partial Ui}{\partial xk} + \frac{\bar{P}}{\rho}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Ui}{\partial xi}\right) - \frac{\partial}{\partial xk}(\overline{UiUjUk}) - \frac{\partial}{\partial xk}\frac{\bar{p}}{\rho}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right) - 2V\frac{\partial Ui}{\partial xk}\frac{\partial Uj}{\partial xk} + V\frac{\partial^2 Rij}{\partial xk \partial xk} \quad \text{(II-13)}$$

Cette équation fait apparaitre au second membre plusieurs contributions : les deux Premiers termes traduisent l`action des gradients de vitesse moyenne sur le champ turbulent et représentent la production des tensions de Reynolds (son signe peut dans certain cas être Négatif). Le terme de corrélation pression-déformation s`annule par contraction et réalise Dance une redistribution d`énergie sur les composantes des tenseurs de Reynolds. Schématiquement on écrira [8]

$$\frac{\partial Rij}{\partial t} + \overline{Uk}\frac{\partial Rij}{\partial xk} = pij + Tij + Dij - \varepsilon ij + v\frac{\partial^2 Rij}{\partial xk \partial xk} \quad \text{(II-14)}$$

T_{ij} = Transport diffusif du à la fluctuation de vitesse et aux fluctuations de pression.

P= production.

εij= Dissipation visqueuse (car il constitue un puits du a la viscosité' moléculaire).

D_{IJ} = Diffusion visqueuse.

L'équation (II.12) est appelée équation de tension de Reynolds ou équation des corrélations Doubles $R_{IJ}=\overline{U_J U_I}$

II.2.4.4. Équation de l'énergie cinétique fluctuante [8]: $K=\frac{1}{2}R_{ij}$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{Uk}\frac{\partial k}{\partial xj} = \overline{UiUk}\frac{\partial Ui}{\partial xk} - \frac{1}{2}\frac{\partial \overline{UiUjUk}}{\partial xk} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{Ukp}}{\partial xk} + V\frac{\partial^2 K}{\partial xk \partial xk} - v\frac{\partial \overline{Ui\partial Uj}}{\partial xk \partial xk} \quad \text{(II-15)}$$

Cette équation que l'on peut obtenir par contraction tensorielle de l'équation aux Tensions de Reynolds, exprimé que la variation de l'énergie cinétique de la turbulence est due Aux effets des termes du second membre :

Production d'énergie par action des gradients de vitesse moyenne sur la turbulence,

Transport par diffusion sous l'action des fluctuations de vitesse et de pression ; dissipation visqueuse et enfin diffusion visqueuse.

Schématiquement on écrira [8]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{Uk}\frac{\partial k}{\partial xk} = p + D - \varepsilon + V\frac{\partial^{\ddot{y}} K}{\partial xk\partial xk} \qquad \text{(II-16)}$$

L'équation de K est utilisée notamment dans les modèles simplifiées a un ou deux équations de transport.

II.2.4.5. Équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique fluctuante

Multipliant l'équation (II.11) par :

$$(-2v\frac{\overline{UkUı}}{\partial xj\partial xj})$$

Et prenant la moyenne, on obtient le résultat final après quelques regroupements simple [7]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{Uk}\frac{\partial \varepsilon}{\partial xj} = -2v\frac{\partial \overline{Uk}\partial^2 \overline{UL}}{\partial xi\partial xj\partial xk} + \frac{\partial \overline{Uk}\partial \overline{Uı}\partial \overline{Uı}}{\partial xi\partial xj\partial xk} + \frac{\overline{UıUı}\partial \overline{Uk}}{\partial xi\partial xj\partial xk} \qquad \text{(II-17)}$$

L'équation du taux de dissipation de l'énergie turbulente est plus délicate à interpréter et a Modéliser, elle est utilisée pour calculer l'échelle de longueur caractéristique de la Turbulence. Cette équation est analogie à celle citée par Biesel [4] en 1972.

II.2.5. Problème de fermeture des équations

Le système à résoudre comporte alors plus d'inconnues que d'équation, d'où la Nécessite d'utiliser des modèles de fermeture pour le fermer.

On pourrait poursuivre la démarche, on trouve de nouvelles équations qui introduiraient à leur tour de nouvelles inconnues, ainsi que l'équation exacte d'un moment d'ordre N= $(\overline{U_{i1}U_{i2}U_{i3}\ldots\ldots\ldots\ldots U_{in}})$ implique nécessairement un moment d'ordre supérieur.

Il est donc nécessaire de modéliser les inconnues supplémentaires à l'aide de lois Complémentaire n'introduisant pas de nouvelle inconnue : modèle de fermeture.

Tableau II.1 : la décomposition de Reynolds dans les équations de Navier Stokes.

Inconnue à calculer	Equation disponible	Nombre des équation	Inconnues supplémentaires	Nombre total des Inconnues
Champ de vitesse moyenne u_i(3) moyenne (1)	(1) Continuité (3)N_S moyenne	(4)	Tension de Reynolds $\overline{U_i U_j}$ (6)	10
Champ de vitesse moyenne u_i(3) pression moyenne (1) tension de Reynolds $\overline{U_i U_j}$ (6)	(1) continuité (3)N_S moyenne (6) tension de Reynolds	10	Corrélation triple $\overline{u_i u_j u_k}$ **(10)** corrélation pression vitesse $\overline{u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j}}$ (9) corrélation gradient de vitesse $\overline{\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}}$ (6)	(35)

Le problème donc est celui de la liaison entre les tensions de Reynolds et le champ Moyen. Pour réaliser la fermeture, des hypothèses et des modèles supplémentaires seront Nécessaires pour traduire le comportement du milieu turbulent, il permet alors d'obtenir un Nombre d'équation égale à celui des inconnues et ces équations peuvent ensuite être résolues Par voie numérique.

II.2.6. Quelques hypothèses classiques de la fermeture de turbulence

II.2.6.1. Hypothèse de chou

$$V_t = C\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \qquad \text{(II-18)}$$

II.2.6.2.Hypothèse de viscosité turbulente de bousines

$$-\overline{UjUl} = \nu \left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi} \right) - \frac{2}{3} k\delta_{ij} \qquad \text{(II-19)}$$

II.2.6.3.hypothèse de longueur de mélange de Prandtl

$$V_t = L^2 m \left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi} \right) \qquad \text{(II-20)}$$

Qui devient en écoulement de type couche limite :

$$V_t = L^2 m \frac{\partial U1}{\partial U2} \qquad \text{(II-21)}$$

Lm : Etant la longueur de mélange qui peut être détermine' facilement pour un certain nombre d`écoulement.

II.2.6.4. Hypothèse de Prandtl-Kolmogorov

$V_t = C_v \sqrt{KL}$

II.2.7. Les modèles de turbulence et leurs classifications

II.2.7.1.Les modèles à viscosité turbulence algébrique (modèle à zér équation de transports)

Aucune équation de transport n'est utilisée dans ce modèle, les tensions de Reynolds
Sont directement liées aux valeurs moyennes. En s'inspirant de la théorie cinétique des gaz Prandtl, (La première génération de la modélisation de la turbulence 1925). Suggéra que la viscosité turbulente soit mise sous la forme de produit d'une vitesse et d'une longueur Caractéristique du mouvement turbulent.

La longueur utilisée est dite « longueur de mélange » et la vitesse caractéristique
S'exprime par l'hypothèse suivante [5]:

$$V = Lm \sqrt{(2dij)^2} \qquad \text{(II-21)}$$

Ce qui conduit à l'expression suivante de la viscosité turbulente :

$$VT = LmV = Lm^2\left(\sqrt{\frac{\overline{oci}}{oxj}} + \sqrt{\frac{\overline{oci}}{oci}}\right)^2 \qquad \text{(II-21-a)}$$

Lm : Longueur de mélange

La longueur de mélange se calcul suivant le type d'écoulement des expressions
Variées, obtenus en générale a partir de l'expérience, sont en effet disponibles pour les écoulements standard.

Cependant, ces modèles ignorent complètement le caractère non local de la turbulence.

II.2.7.2. Les modèles à une équation de transport

Ces modèles introduisent dans la définition de VT au moins une grandeur turbulente décrire par une équation d'évolution si on utilise l'équation de l'énergie cinétique de la turbulence K sous forme modélisé. On pourra déterminer VT par l'expression du type kolmogrov-Prandtl [6].

$$V_T = Ca\ Ls \sqrt{k} \qquad \text{(II-23)}$$

Où Ls est une échelle de longueur des grandes structures turbulentes donnée en chaque PT de l'écoulement.

II.2.7.3. le modèle k-ε et RNG (modèle à deux équations de transport)

Le modèle k- [launder & spalding, 1974] est certainement le modèle le plus répandu.

La viscosité turbulente est donnée par la relation [6]:

$A_t = pc_a \frac{k^2}{\varepsilon}$ (II-24)

Où ε taux de dissipation visqueuse de l'énergie cinétique turbulent, est donnée par la relation Suivante:

$\varepsilon = a\ \overline{\nabla\bar{U} : \nabla t\bar{U}}$ (II-24a)

Les deux équations de fermeture s'écrivent :

$\rho(\frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{U}\nabla)k) = \square((a + \frac{at}{\sigma k})\ \square k + P + G - \rho\varepsilon)$ (II-24-b)

$$\rho(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{U}\nabla)\varepsilon) = \square((a + \frac{at}{\sigma\varepsilon})\ \square\varepsilon + C\varepsilon 1\ (P + C\varepsilon 3\ G)\frac{\varepsilon}{k} - C\varepsilon 2\frac{\varepsilon^2}{K}$$

Avec :

$P = \alpha_t t_r\ (\square\bar{U} : \nabla\bar{U} + \nabla^t\bar{U} : \nabla\bar{U})$ (II-24-c)

$G = -\frac{\alpha t}{\sigma t}\beta g.\square\bar{T}$

Les constantes, déterminées empiriquement par les auteurs du modèle, sont données dans le Tableau suivant :

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_K	$\sigma_\varepsilon C_K$	σ_T	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 2}$
0.09	1.44	1.92	1	1.3	1	0.7

Tableau II.2 : constantes du modèle k-ε

Cette modèle est très répandu de part sa simplicité, sa robustesse et sa facilité de mise en œuvre .Bien que les aspects généraux des écoulements soient bien simulés, il apparaît Certaines insuffisances dues notamment à la valeur des constantes et au fait que le modèle est trop diffusif. Les modifications apportées au modèle k-ε sont nombreuses, dont notamment les extensions suivantes

II.2.7.4. Le modèle k-ε deux couches

[Chen 1 Patel, 1988] qui, a proximité des parois, utilise un modèle a une équation (Pour k) et exprime a l'aide d'une longueur caractéristique déterminée par une formule Algébrique fonction du nombre de Reynolds.

II.2.7.5. Le modèle k-ε étendu

[Chen & Kim, 1987], qui ajoute un terme a l'équation du taux de dissipation pour que le transfert d'énergie réponde plus efficacement à la déformation moyenne de l'écoulement, rend le modèle moins d'effusif, le modèle RNG, développe' par le groupe de re-normalisation [yakhot 1 Smith, 1992]. Il consiste en une estimation au cours du calcul de la constante Cε1,

remplacée dans l`équation de dissipation par Cε1 donnée par l'expression (II.27). Cette expressions ajoute un terme fonction du taux de déformation η à l'équation du taux de dissipation le rendant ainsi moins diffusif.

$$C'\varepsilon 1 = C\varepsilon 1 - \eta\frac{(1-\eta 0)}{1+\beta\eta 3} \qquad (II\text{-}25)$$

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_K	σ_ε	σ_T	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 2}$	η_0	β
0.005	1.42	1.68	0.7179	0.7179	1	0.7	4.33	0.012

Tableau II.3 : constantes du modèle RNG.

II.2.7.6. Modèle Algébrique aux tensions de Reynolds (ASM)

A partir des équations de Reynolds, Robin (1972) a proposé que le transport (Convection plus diffusion) des contraintes de Reynolds est proportionnel a celui de L'énergie cinétique turbulente on a [4] :

$$\frac{\partial(\rho Uk\overline{UiUj})}{\partial xk} - D_{ij} = \frac{\overline{UiUj}}{k}(P_K - \rho\varepsilon) \qquad (II\text{-}26)$$

Ou : $\frac{\overline{UiUj}}{k}$ Est le coefficient de proportionnalité qui n'est pas une constante en générale L'introduction de cette hypothèse (II. 19) Dans l'équation de transport est de la forme Suivante :

$$\frac{\partial(\rho Uk\overline{UiUj})}{\partial xk} = D_{ij} + P_{ij} + R_{ij} = \frac{2}{3}\rho E\delta ij \qquad (II\text{-}27)$$

Ou [4],[5]

$$\overline{U_I U_J} = k\left(\frac{\frac{2}{3}\delta_{IJ} + ((C_1 - C_2)\left(\frac{P_{ij}}{\varepsilon} - \frac{2P_K}{3\varepsilon}\delta_{ij}\right))}{(\rho c_1 + \frac{P_k}{\varepsilon} - \rho)}\right) \qquad (II\text{-}28)$$

Avec :

Ou :

$$P_{ij} = -\rho\overline{UiUk}\frac{\partial U}{\partial xt} - \rho\overline{UiUj}\frac{\partial Ui}{\partial xk} \qquad (II\text{-}29)$$

La sommation de [3.17] donne la production d'énergie turbulente :

Ou :

$$Pk = \frac{1}{2}P_{ij} \qquad (II\text{-}30)$$

Pour la redistribution d'énergie, différents modèles sont proposés dans le présent code (TEAM), ils ont utilisés le modèle suivant :

$$R_{ij} = R_{ij,1} + R_{ij,2} + R_{ij,W} \quad \text{(II-31)}$$

Ou :

$$R_{ij,1} = C_1\rho\varepsilon\left(\frac{\overline{U_i U_j}}{k} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\right) \quad \text{(II-32)}$$

$$R_{ij,2} = -C_2\left(P_{ij} - \frac{2}{3}Pk\delta ij\right) \quad \text{(II-33)}$$

Et, w (les termes a la proximité de la par

$$R_{11,w} = \left\{C'_1\frac{\varepsilon}{K}V'^2 - C_2C'_2(P_{22} - \frac{2}{3}P_K)\right\} f$$

$$R_{11,w} = \left\{2C'_1\frac{\varepsilon}{K}V'^2 - C_2C'_2(P_{22} - \frac{2}{3}P_K)\right\} f \quad \text{(II-34)}$$

$$R_{11,w} = \left\{C'_1\frac{\varepsilon}{K}V'^2 - C_2C'_2(P_{22} - \frac{2}{3}P_K)\right\} f$$

$$R_{11,w} = \left\{-1.5C'_1\frac{\varepsilon}{K}\overline{UV} + 1.5C_2C'_2P_{12}\right\} f$$

Et le terme F est donnée par:

$$F = \frac{k^{3}/_{2}}{2\varepsilon xn} \quad \text{(II-35)}$$

La fermeture de l'équation (II, 28) est enfin achevée par l'équation suivante pour l'énergie turbulente K:

$$\frac{\partial}{\partial xi}(\rho UK) = \frac{\partial}{\partial xk}\left(C_k\frac{k}{\varepsilon}\overline{UkUi}\frac{\partial k}{\partial xi}\right) + P_k - \rho\varepsilon \quad \text{(II-36)}$$

Et pour la fermeture de l`équation de dissipation s on a :

$$\frac{\partial}{\partial xi}(\rho U1\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial xk}\left(C\varepsilon\frac{k}{\varepsilon}\overline{UKUJ}\frac{\partial\varepsilon}{\partial xj}\right) + \frac{\varepsilon}{K}(C\varepsilon 1Pk - C\varepsilon 2\rho\varepsilon) - \rho\varepsilon \quad \text{(II-37)}$$

Tableau II.4 : les constantes du modèle ASM.

C_S	C_1	C_2	$C\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\acute{C}_1$	$\acute{C}_2$
0.22	1.8	0.6	0.15	1.44	1.92	0.5	0.3

2L'ensemble des équations (II.36), (II.37) et (II.28) constitue le modèle de contrainte algébrique.

La distribution des équations (II-37) à (II-36) dans l'équation (II-28) donne le système algébrique suivant :

$$\alpha i1\,\overline{U'^2} + \alpha_{i2}\overline{U'^2} + \alpha i3\overline{U'V'} + \alpha_{i4}\overline{W'^2} = b_i \quad \text{(II-38)}$$

La condition de contraintes normales inconditionnellement positives est assurée par la Détermination simultanée de toutes les contraintes normales par la résolution du système algébrique suivant :

$$\begin{pmatrix} \alpha 11 & \alpha 12 & \alpha 13 \\ \alpha 21 & \alpha 22 & \alpha 23 \\ \alpha 31 & \alpha 32 & \alpha 33 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho\overline{U^2} \\ \rho\overline{V^2} \\ \rho\overline{W^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \end{pmatrix} \quad \text{(II-39)}$$

Où les coefficients sont définis tel que :

$$\alpha ij \leq 0 \quad \text{pour} \quad i \neq j \quad \text{(II-40)}$$

Le système algébrique (II-39) est résolu par le théorème de cramer.

Soit :

$$\rho\overline{U^2} = \frac{\nabla 1}{\nabla} \quad , \quad \rho\overline{v^2} = \frac{\nabla 2}{\nabla} \quad , \quad \rho\overline{W^2} = \frac{\nabla 3}{\nabla}$$

Une fois les contraintes normales déterminées, nous calculons la contrainte de cisaillement Par :

$$\overline{U'V'} = -\frac{\alpha 31}{\alpha 33} U'^2 - \frac{\alpha 33}{\alpha 33} V'^2 - \frac{\alpha 32}{\alpha 33} W'^2 - \frac{b3}{\alpha 33} \quad \text{(II-41)}$$

II.3. Modélisation du transfert de chaleur

II.3.1. Equation d'énergie

La modélisation des transferts de chaleur est basée sur une formulation en température des échanges thermiques, dans laquelle le changement de phase ou la dissipation visqueuse sont pris en compte grâce à des termes sources ou polynomiaux formulés en terme de température.

II.3.2.Transferts de chaleur en écoulements incompressibles

La modélisation des transferts thermiques convectif et conductif en interaction avec un écoulement incompressible sont modélisés à partir d'une formulation conservative et d'une approche non-conservative [2].

$$\rho Cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \square(VT)\, T\square V\right) + \alpha T = \square(\lambda \square T) + \square + S \quad \text{(II-42)}$$

S (Le terme αT est un terme linéaire laissé à la libre utilisation de l'utilisateur ainsi que le terme source S.

Le terme φ est le terme de dissipation visqueuse donnée par la relation suivante :

$$\square = 2\mu Dij \frac{\partial Ui}{\partial xi} \quad \text{avec} \quad D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right) \quad \text{(II-43)}$$

II.4.Méthode de VoF

La méthode VOF est une méthode qui a été introduite par Hirt 1 Coll. en 1981 qui s'utilise pour la simulation d'écoulements entre plusieurs phases non miscibles.

Il s'agit d'une méthode Eulérienne à 1 fluide, et elle est particulièrement adaptée dans le cas d'écoulements à interfaces fortement déformées, puisqu'elle permet de suivre la position de l'interface dans un maillage fixe.

II.4.1.Idée fondatrice

L'idée fondatrice de la méthode VOF est d'utiliser une fonction discrète qui représente la fraction volumique d'un des fluides dans chaque volume de contrôle. Cette fonction taux de présence, notée α_k, varie donc entre 0 et 1 pour la phase k considérée. Si elle vaut 0 ou 1, le volume ne contient qu'un seul des deux fluides. Si sa valeur est comprise entre ces deux bornes, le volume contient un mélange diphasique, et donc l'interface y est présente.

0,95	0,8	0,3	0	0
1	1	1	0,6	0
1	1	1	1	0,3
1	1	1	1	0,8
1	1	1	1	0,95

Exemple : taux de présence en fluide bleu dans les volumes de contrôle

II.4.2.Equation sur le taux de présence

Afin de suivre l'interface dans son mouvement, la fonction taux de présence α_k est adentée par le champ de vitesse local, selon l'équation d'advection classique :

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + u.\nabla \alpha_k = 0 \qquad \text{(II-44)}$$

Si le problème étudié ne comporte que deux phases, il suffira de calculer une seule fois le champ de cette fonction α_k afin de repérer chacune des deux phases dans tout l'espace : on calculera par exemple le champ α_2 puis on déterminera α_1 sous la contrainte $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Ainsi, la méthode VOF est naturellement conservative, ce qui en fait un atout majeur.

II.4.3.Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle

Pour un système à plusieurs fluides, on écrit naturellement la masse volumique du mélange en pondérant les masses volumiques de chacune des phases par leurs taux de présence :

$$\rho = \sum \alpha_k \rho_k \qquad \text{(II-45)}$$

Pour la viscosité du mélange, en utilisant aussi les taux de présence α_k comme coefficients, on écrit :

$$\mu = \frac{\sum \alpha_k \rho_k \mu_k}{\alpha_k \rho_k} \quad \text{(II-46)}$$

II.4.4.Equation de conservation de la quantité de mouvement

Une seule équation de bilan de quantité de mouvement est écrite pour tout le domaine, et le champ de vitesse qui est calculé est ensuite "partagé" entre les deux phases. L'équation de Navier- stokes incompressible s'écrit (en régime laminaire) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \square.(uu) = -\frac{1}{\rho}(\square\rho + \mu\square^2 u) + \frac{1}{\rho}F_{SF} \quad \text{(II-47)}$$

Il est important de tenir compte, dans un problème diphasique, de la tension de surface entre les fluides et des effets d'adhérence à la paroi (à travers l'angle de contact au niveau d'une ligne triple).

II.4.5.Tension inter faciale

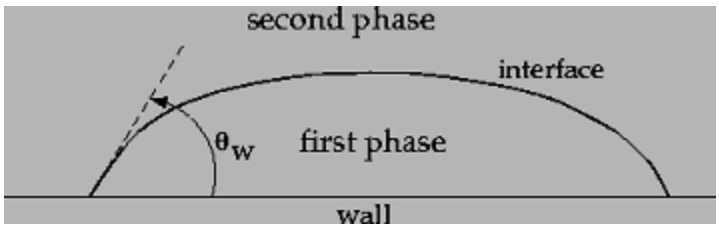
La tension inter faciale est due aux forces cohésives qui existent entre molécules voisines d'une phase condensée, et tend à minimiser l'aire de l'interface entre ces molécules et celles d'une autre phase. Ainsi, elle s'oppose à la déformation de l'interface. Cette force est à l'origine des phénomènes capillaires, qui commencent à être très importants à partir de l'échelle millimétrique, et omniprésents à échelle submillimétrique. De cette façon, à travers une interface, la différence de pression qui règne – appelée pression capillaire – peut s'exprimer à l'aide de la tension inter faciale σ par :

$$P_2 - p_1 = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad \text{(II-48)}$$

où R_1 et R_2 sont les rayons de courbure des deux surfaces de part et d'autre de l'interface.

II.4.6.Angle de contact

L'angle de contact est une mesure de l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité. Cette adhésion du liquide à la paroi est due à des forces d'attraction entre les molécules du liquide et la paroi.



Angle de contact au niveau d'une ligne triple

II.4.7.Prise en compte dans le modèle VOF

Ainsi, le terme source F_{SF} dans l'équation de quantité de mouvement s'écrit en fonction de la tension de surface σ :

$$F_{SF} = \sigma\, k\, \mathrm{n}\, \frac{\alpha_1\rho_1+\alpha_2\rho_2}{\frac{1}{2}(\rho_1+\rho_2)} \qquad \text{(II-49)}$$

où *n* est la normale à l'interface et k la courbure, qu'on définit par :

n= $\nabla\alpha_2$

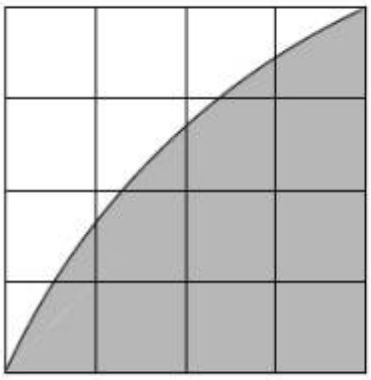
K= -($\nabla.\hat{n}$) = (($\frac{1}{|n|}\frac{n}{|n|}.\nabla$)$|n|$ - (∇.n))

En cas d'adhérence à la paroi, la notion d'angle de contact intervient en tant que condition à la limite en paroi : il est utilisé pour ajuster la normale à la surface dans les cellules proches de la paroi : on calcule cette normale à la surface à la cellule adjacente à la paroi par

$$\hat{n} = \widehat{n_w}\cos\theta_w + \widehat{t_w}\sin\theta_w \qquad \text{(II-50)}$$

Traitement numérique et interpolation prés de l'interface sous fluent

L'équation permettant de suivre l'interface dans son mouvement (équation d'advection sur le taux de présence) peut être traitée numériquement soit à l'aide d'un schéma temporel implicite, soit à l'aide d'un schéma temporel explicite. La qualité de la méthode VOF dépendra de la discrétisation de cette équation, mais aussi des méthodes de reconstruction d'interface, développées pour améliorer sa description. Ces méthodes de reconstruction permettent de calculer les flux convectifs et diffusifs à travers les faces des volumes de contrôle. La figure ci-dessous en présente un exemple, avec les méthodes de reconstruction "GeoReconstruct" et "donor-acceptor" de Fluent.



actual interface shape

II.5. Conclusion

Dan ce chapitre nous à parmes le fixe la méthode de oscillation le model mathématique qui ne paramétra de résoudre de problème des phasique par la méthode eu le rien nom VOF un ces que la méthode de chaleur spécifique équivalente pour le contrôle de changement de phase (solidification).

La résolution analytique du problème générale est impossible d'où la nécessité des méthodes numérique qui sont le but du chapitre suivant.

III.1.Introduction

Pour résoudre un problème de la physique il faut distinguer le modèle physique du modèle mathématique. Le modèle physique peut s'exprimer en mots et phrases qu'il est nécessaire de traduire en expressions mathématiques. Lorsque le problème est ainsi bien Posé, il est alors possible de le résoudre soit mathématiquement (solution analytique) ou numériquement (solution numérique). Les solutions analytiques, basées sur la forme locale du problème (Equations aux Dérivées Partielles: « E.D.P. » associées aux conditions initiales et aux limites), ne peuvent être déterminées dans le cas général sauf dans certains cas classique connus depuis bien longtemps. Dans le cas général où il y'a des difficultés si l'on résoudre les équations aux drivées partielles qui régissent les phénomènes étudiés, on fait appel aux méthodes numériques, le principe de ces méthodes est de transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques.

III.2.Les méthodes numérique

Il y'a trois méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des Systèmes d'équations aux drivées partielles régissant les écoulements. Ces méthodes sont :

- la méthode des différences finies.
- la méthode des éléments finis.
- la méthode des volumes finis.

III.2.1.méthode des différences finies

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans
Le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la Fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

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 dérivées ou les gradients de l'inconnue.

III.2.2.méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à rapprocher les équations différentielles régissant pour un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'ils peuvent facilement être programmés. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais ils ont été étendus à de nombreux problèmes du terrain. Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et

dont les **s**ommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux. Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition est le maillage. Un bon maillage doit faciliter les opérations Prévues par un programme d'ordinateur. Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des éléments et des nœuds.

Avantages : traitement possible de géométries complexes, détermination plus naturelle Des conditions aux limites, possibilité de démonstrations mathématiques de convergence.

Inconvénients : complexité de mise en œuvre et coût en temps de calcul et en mémoire.

III.2.3.méthode des volumes finis

Cette méthode est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles comme la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis mais, contrairement à la méthode de différence finies qui utilise des approximations de dérivées, la méthode de volume fini utilise comme la méthode d'éléments finis, des approximations d'intégrales. Dans la méthode des volumes finis les lois de conservations (de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sons une forme intégrale. La clé de cette méthode réside dans l'application du théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski, qui permet de changer une intégrale de volume en intégrale de surface. L'un des principaux avantages de la méthode des volumes finis est d'assurer une conservation Intégrale exacte des grandeurs quelle que soit la taille du maillage et c'est pour raison qu'elle est très largement utilisée pour la résolution des phénomènes gouvernés par des équations à dérivées partielles.

III.3. Résolution des équations par éléments finis

III.3.1Introduction Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode D'interpolation et une méthode vibrationnelle.

Etant donnés un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0,

a) la méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite `a partir d'un nombre finis de réels

b) la méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations.

Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en n'importe quel point de l'élément par interpolation.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée

$\square_n^k$, estde la forme : $\square_n^k(x, y) = \sum_{i=0}^{NK} = \square_i N_i(x,y)$ (III-1)

Ou $\square_i$ désigne la valeur de la fonction approchée $\square_i$ au point xi de coordonnées (xi, yi) ,Ni la fonction d' interpolation associée à xi ,Nk le nombre de fonction utilisées pour l'élément k, Les coefficients $\square$i de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret ,les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie Nk dans lequel on cherche à priori la solutions discrète $\square$.

Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est Utilisée :on minimise l'erreur commise est minisée en remplacent dans les équations aux dérives partielles la fonctions exacte par la fonction approchée, pour cela ,on projette l'erre sur un espace de fonction $\square$h à préciser.La méthode de galerkin est un cas particulier de la méthode des résidus pondérés ,l'espace Projection est le même que l'espace d'approximation de la solution du problème , autrement dit $\square$h = Nh.

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

III.3.2.1. Formation variation elle forte

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

Trouver u(x) u(x)ϵespace des solutions Us tel que [10].

$$\mathcal{L}(u) - F = 0 \; \forall \; x \in \Omega \; B(u) = u_0 \; \forall \; x \in \Gamma_{u_0} \qquad \text{(III-2)}$$

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

III. 3.2.2 formation vibrationnelle faible

La formation vibrationnelle faible peut être obtenue par l'étable suivante :

1. Approcher la solution u. partout dans le domaineΩ, par u tel que [10]

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^{n} Ni\,\overline{Ui} \qquad \text{(III-3)}$$

On Ni =Ni (x, y) désignent les fonctions $\bar{U}$ et des valeurs nodales interminées

2- introduire (III-3) dans (III-2) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que

$$\varepsilon = \zeta(\bar{U}) - F \neq 0 \qquad \text{(III-4)}$$

3- obstiner une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire w tel que

$$\int w\,(\zeta(\bar{U}) - F)\,d\Omega = 0,\ k = 1, 2, 3\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots N \qquad \text{(III-5)}$$

On N nombre d'inconnues indépendants du système (III-2)

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

On pose:

$$W_k = N_k \square \int Nk\,\zeta(\sum_{i=1}^{n} Ni\bar{u}i)\,d\Omega = 0 \qquad \text{(III-6)}$$

On-dit que u ε H^1_0 (Ω) est une solution faible de (III-5) si :

 v ϵH_0^1 (Ω) a ($\bar{U}$, V) (III-7)

a ($\bar{U}$, V) est la forme bilinéaire associée à (ζ) soit Ωun ouvert borné R^d et dΩ est réqulier.on considére alors le probléme :

Lu = f sur Ω et u= 0 sur dΩ= 0 (III-8)

III.3.3.forme générale des équations du système [10]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c\phi + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x C\phi\phi)\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_y C\phi\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(T\phi\frac{\partial\phi}{\partial y}) + S\phi \quad \text{(III-9)}$$

Ou :

ϕ : Variable généralisée

$_C\phi$: coefficient d'advection transitoire

Tϕ : ceofficient de diffusion

Sϕ : termes source

Le tableau (III-9) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système

Variable Ø	Coefficient d'advection $C_\emptyset$	Diffusivité $\Gamma_\emptyset$	Termes source $S_\emptyset$
V_x	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right) - \delta\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
V_y	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) - \delta\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
T	1	$\frac{K}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{pc^e}$
P	1	0	0

Tableau III-1 : expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables

III.4.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-1) « 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

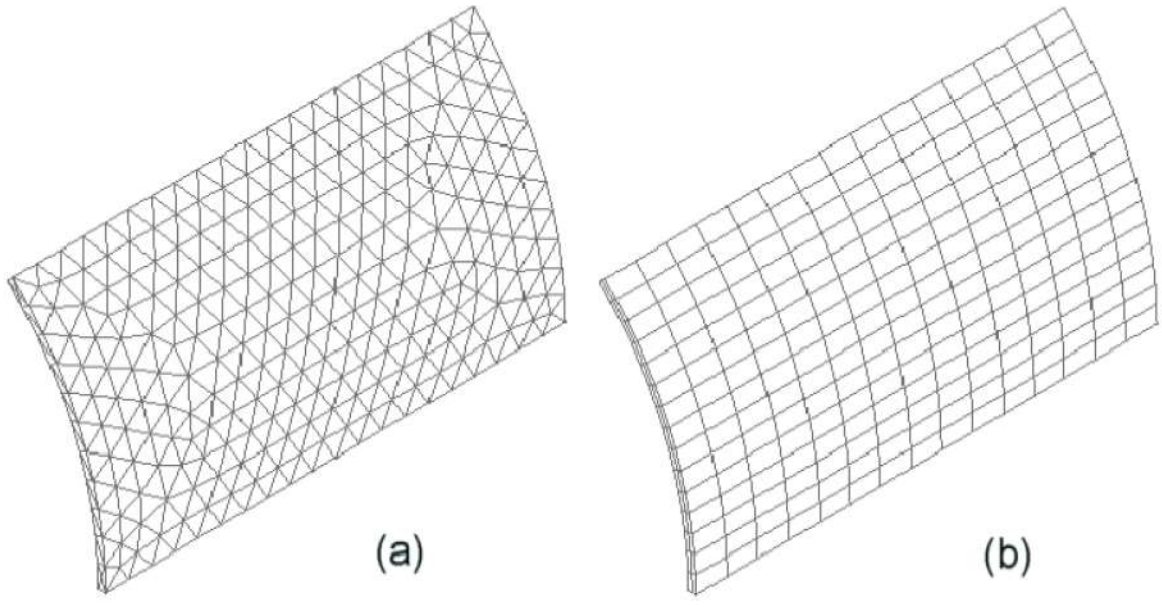


Figure III-1 (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique

III.4 .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 [10].

$([A_B^{transient}] + [A_e^{adverction}] + [A_e^{didffusion}])(\phi e) = (S_e^{\phi})$ (III-10)

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

III.4.1.1.Terme temporelle

Le premier des contributions de l'élémentaire est le terme de transition, sa forme générale est simplement [10] :

Générale est simplement [10] :

$[A_e^{transien}] = \int w^e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} d\,(vol)$ (III-11)

Avec :

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

$\int w^e \frac{(\partial \rho C \phi \phi)^2}{\partial t} d\,(vol) = \int w_i^e \rho c \phi w_j^e d(vol) \frac{\partial \phi_i^e}{\partial t} + \int w_i^e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} w_j^e \, d\,(vol)\, \phi_j^e$ (III-12)

Les indices inférieurs I et j indiquent le nombre de nœud, si la deuxième partie de l'équation (III-11) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme :

$Mij = \int w_i^e \, \rho \, c \phi w_j^e d\,(vol)$ (III-13)

Si l'approximation localisée de masse est employée

$Mij = \delta ij \int w_i^e \, \rho c \square \, d\,(vol)$ (III-14)

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.

$(\rho\square)n=(\rho\square)_{n-1}+ \square t[\delta(\frac{\partial(\rho\square)}{\partial t}) + (1-\delta)(\frac{\partial(\rho\square)}{\partial t})_{n-1}$ (III-15)

Ou :

δ= coefficient d'intégration de temps pour la méthode newmark l'équation (III-14) est écrite comme suite :

$(\frac{\partial(\rho\square)}{\partial t})_n = \frac{1}{\square t\delta}(\rho\square)_n - \frac{1}{\square t\delta}(\rho\square)_{n-1} + (1 - \frac{1}{\delta})$ (III-16)

III.4.1.2. Terme d'advection

Il ya trois approches pour la siscrétation du terme d'advection, l'approche dit ligne de courant monotone upwind (MSU), la ligne profilée upwind/petro –Galerkin (SUPG), et le approches colloquées de galerkin(COLG).

III.4.1.2.1. monotone streamline upwind approach (MSU)

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des caractéristiques, il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transportée dans domaine connu de vitesse.

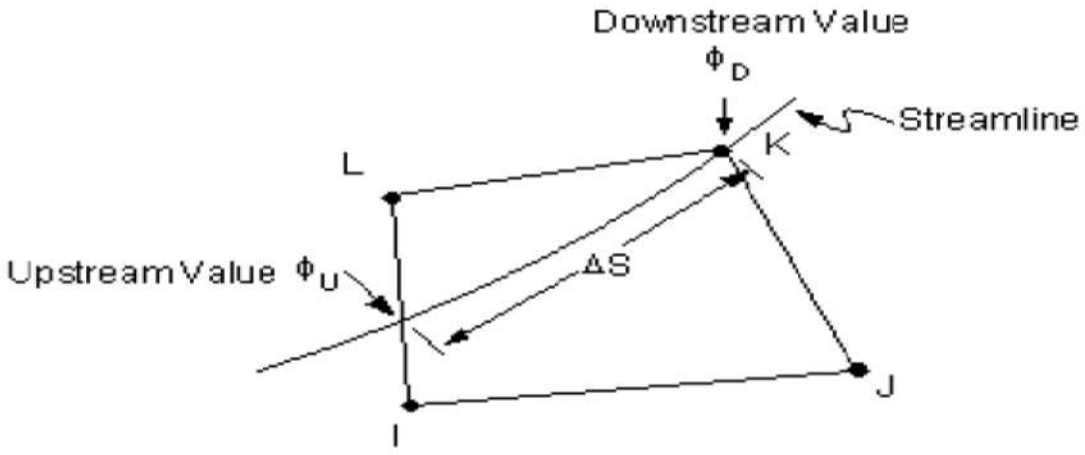


Fig. (III-2) :l'approche de ligne de courant d'upwind

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

Dans le transport pur d'advection. On suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques. C-à-d tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut d'advection , s'écrit [10] :

$$\frac{\partial(\rho V x C\square)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V y C\square\square)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho V s C\square)}{\partial s} \qquad \text{(III-17)}$$

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

$$[A_e^{advection}] = \frac{d(\rho V s C\square\square}{dy} \int w^e \, \mathrm{d(vol)} \qquad \text{(III-18)}$$

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 :

$$\frac{d(\rho V s C\square)}{ds} = \frac{(\rho V s C\square)u}{Ds} \qquad \text{(III-19)}$$

Ou :

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

U : l'indice de la valeur prise à l'endroit ou la rationalisation dans e nœud sous le vent pénètre dans l'élément.

Δs: la distance du point situé en amont à l'avat nœud.

La valeur à l'endroit ascendant ast inconnue mais peut etre exirmée en termes de valeurs nodales inconnues qu'il est entre l'amont et l'avat .

Le processuse consiste à cycle par tous pour l'élement et identifier les nœuds arriére ,le calcul effectué est base sur les vitesse ,pour vois d'où elle est venue la ligne profilée dans le nœud.

Des facteurs pesants sont calculés ,basé sur la proximite de l'éndroit d'upwind aux noeuds Voisins.

$$[A_e^{advection}] = \int w^e \left\{\frac{\partial(\rho VxC\square\square)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\square\square)}{\partial y}\right\} d(vol) + C_2\tau \int \frac{zh}{2umag}\left\{Vx\frac{\partial w^e}{\partial x} + Vy\frac{\partial w^e}{\partial x}\right\}\left\{Vx \frac{\partial(\rho C\square\square)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\square\square)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III-20)}$$

Ou :

$C_2\tau$: coefficient global réglé à 1.0.

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

$$U_{mag}=\sqrt{Vx^2 + Vy^2}\begin{cases}1 & si \quad 0 \le p \le 3\\ \frac{pe}{3} & si \quad pe \ge 0\end{cases}$$

$Pe = \frac{\rho CpUmag}{2T}$ nombre de peclet

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

III.4.1.2.3.approche colloquée de galerkin(COLG)

L'approche de GOLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué, dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesse, (la vitesse nodales élément – élément –based) qui sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement [10].

$$[A_e^{advection}] = \int w^2\left\{\frac{\partial(\rho VxC\square\square)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\square\square)}{\partial y}\right\} d(vol) + C_2\tau \int \frac{zh}{2U_{mag}^e}\left\{\frac{V_x^e\partial w^e}{\partial v} + \frac{V_y^e\partial w^e}{\partial v}\right\}\left\{\frac{V_x^e\partial(\rho C\square\square)}{\partial x} + \frac{V_y^e\partial(\rho C\square\square)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III-21)}$$

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

III.4.1.3.terme de diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au –dessus du domaine De problème après la multiplication par la fonction pesante [10].

Diffusion contribution = $\int w^e \frac{\partial}{\partial x}(T \frac{\partial}{\partial x}) d(vol) + \int w^e \frac{\partial}{\partial y}(T \frac{\partial}{\partial y}) d(vol))$ (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 pâtie est appliquée [10] :

$\int w^2 \frac{\partial}{\partial x}(T \frac{\partial}{\partial x}) d(vol) = \int \frac{\partial w^2}{\partial x}(T \frac{\partial}{\partial x}) d(vol)$ (III-23)

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

$\frac{\partial}{\partial x} = w_x^e$ (III-24)

$w_x^e = \frac{\partial w^2}{\partial x}$ (III-25)

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme

$[A_e^{diffusion}] = \int w_x^e T w_y^e T) d(vol)$ (III-26)

III.4.1.4. termes source

L'évaluation des termes de source se fait comme suite [10] :

$s_\emptyset^e = \int w^e S d(vol)$ (III-27)

Equation de chaleur : soit V une partie quelconque de V limitée par la surface S

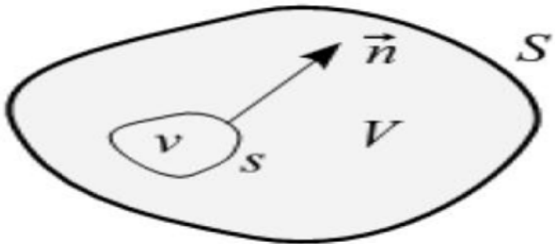


Figure III-3 bilan thermique

La puissance thermique stockée dans V est égale a la somme de la puissance thermique q généré e par les sources volumiques contenues dans V et de la puissance thermique reçue sous forme de flux à travers la surface S [12] :

$\int \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -n(-\overline{\lambda grad} T) ds$ (III-28)

Le domaine V étant arbitraire, on en déduit : en tout point du solide :

$\rho C_p \dot{T} - div(\overline{\lambda grad} T) q = 0$ (III-29)

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (III-28) s'écrit dans le repère orthonormé (x, y) [12] :

$$\rho C_p \dot{T} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \qquad \text{(III-30)}$$

III-5-2- forme discrétisée

Elément finis : La solution analytique de l'équation (III-30)est en général inaccessible ,on est donc conduit à chercher une solution approchée par une méthode numérique : la méthode des éléments finis ,cette méthode est un cas particulier de la méthode de Galerkin :le champ de températures et les fonctions test appartiennent au même espace de dimension fine , le domaine V est décomposé en sous –domaines Ve de forme géométrique simple (les éléments)relies entre eux en des point appelés nœuds ,cette opération s'appelle maillage ,

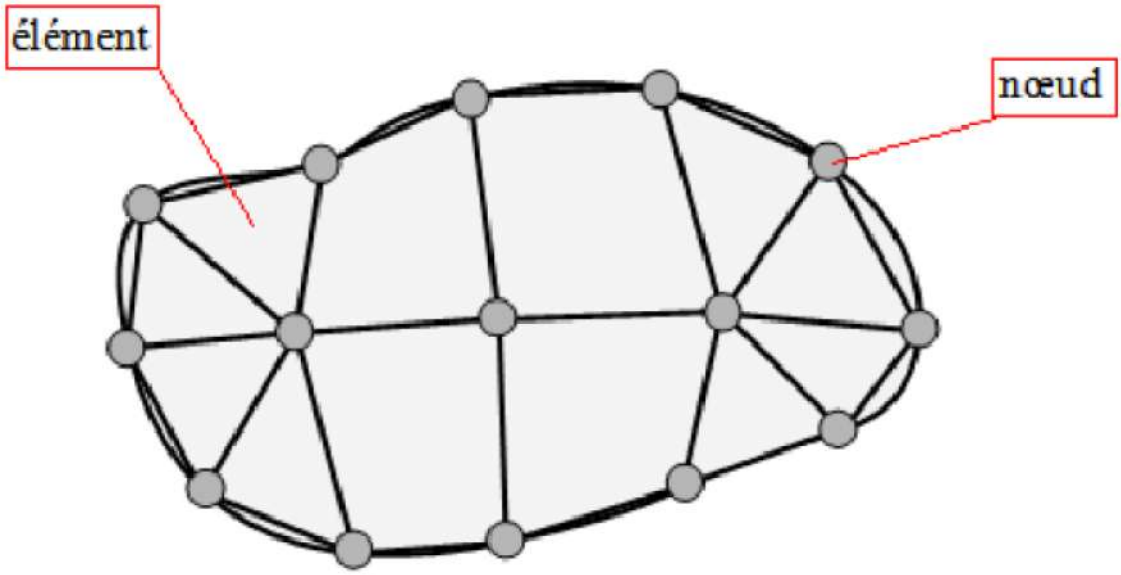


Figure III- 4 : domaine plain discrétise en 12 éléments reliés entre eux par 15

III.5.2.1.représentation élementaire (ou locale) du champ de températures

Le champ de températures T (x,y,t) dans l'élément (e) à pour expression [11] :

$$T^2(x,y,t) = [N_1^e(x,y) \ldots N_i^e(x,y) \ldots N_{n^e}^e(x,y)] \begin{Bmatrix} T_1^e(t) \\ T_i^e(t) \\ T_{n^e}^e(t) \end{Bmatrix} \qquad \text{(III-31)}$$

$$T^e(x, y, t) = [N^e(x, y)] \{ T^e(t) \}$$

Ou :

n^e: est le nombre de nœuds de l élément

Les fonctions N_i^e(x, y) sont les fonctions d'interpolation élémentaires

La matrice N^e (x, y) est la matrice d'interpolation élémentaire

Le vecteur$T_{(t)}^e$ regroupe les températures des nœuds de l »élément(e)

III.5.2.2.représentation globale du champ de températures

les champs de températures T(x, y, t) a pour expression sur l'ensemble du domaine V

$$T(x,y,t)= [N_1(x ,y) \ldots N_i (x ,y)] \begin{Bmatrix} T_1 & (t) \\ T_i & (t) \\ T_n & (t) \end{Bmatrix} \quad \text{(III-32)}$$

T(x ,y,t)= [N(x,y)](T(t))

Ou :

n est le nombre de nœuds du maillage

Les fonction N_i(x,y) sont les fonction d' interpolation (ou fonctio de forme)

(T(t)) est le vecteur des températures nodales

Les fonctions d'interpolation vérifient les relations :

N_i^e(x_i, yi) =δ_{ij} N_i (x_i, yi) =δ_{ij} ;□ i, j

Ou (x_i, $_{yi}$) sont les coordonnées du nœud j

III.5.3. discrétisation de la forme intégrale faible

l'expression du champ de température T sur le domaine T= [N]{T}

Et {gradeT}= [B]{T} avec [B]=[{B_1} ……..B_i……{B_n}]

Ou :{B} dépend du problème traité (spatial, plan, axisymétrique …….) pour un problème spatial, {B_i} s'écrit dans le repère orthonormé (x, y).

$$\{B_i\}= \begin{matrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{matrix}$$

$T^□$= [N]{$T^□$}= {$T^□$}^{T}[N]^T et {gard$T^□$}= [B] {$T^□$},{gard$T^□$}^{T} = {$T^□$}^{T}[B]^T

En portant ces relations dans l'équation (III-28) , il vient :

$$\{T^□\}([c]\{\dot{T}\} + [K]\{T\}- \{f\})= 0 \quad \text{(III-33)}$$

$$[K]=\int [B]^T \lambda [B]dv + \int h[N]^T [N]ds \quad \text{(III-34)}$$

Ou :

[C] :est la matrice de capacité thermique [j /c°]

[K] :est la matrice de conductivité thermique [w/m°C]

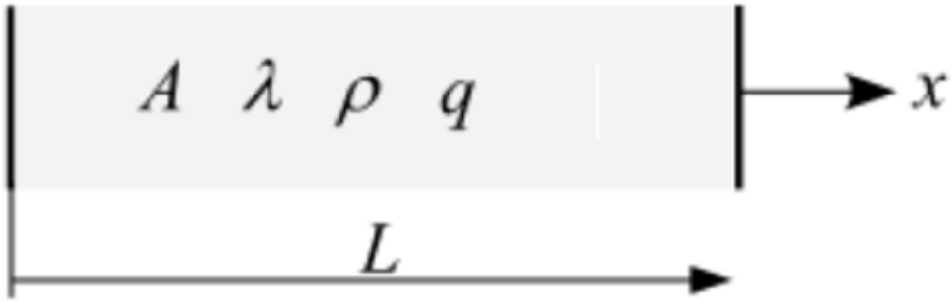
{F} : est la vecteur des flux nodaux[w]

{T} : est la vecteur des températures nodales[C°]

III.5.4. example de calcul élémentaire

Element a deux nœuds (probléme a une dimension)

Considérons un élément à deux nœuds de longueur L dont les caracteristiques A,ρ ,λ,et q sont constants



Fonctions d'interpolation sur un élément à deux nœuds :

N_1^e = 1- $\frac{x}{L}$ N_1^e = $\frac{x}{L}$ L= x_1 + x_2

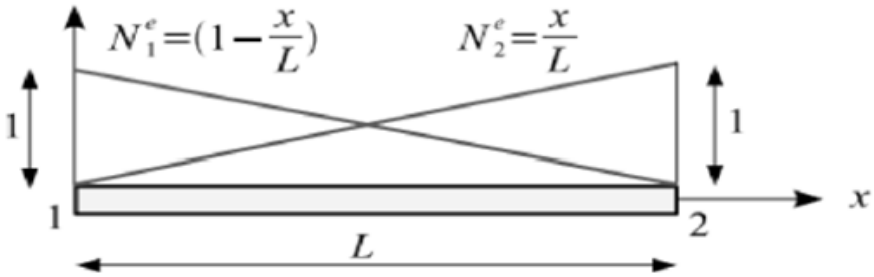


Figure III-5 élément a deux nœuds

Le champ de température dans éléments s'écrit [12] :

$T(x) = (1-\frac{x}{L})\,T_1 + \frac{x}{L}T_2 = \frac{1}{L}[L-x \quad x]\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = [N]\{T\}$ (III-35)

Ou T_1 et T_2 les températures nodales on en déduit la matrice [B] :

Chapitre III méthode numérique

$[B] = [\frac{\partial N_1}{\partial x} \quad \frac{\partial N_2}{\partial x}] = \frac{1}{L}[-1,1], [B]^T = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$ (III-36)

La matrice de conductivité [K] :

$[K] = \int [B]^T \lambda [B] dv = \int_0^l \lambda A [B]^T [B] dx = \frac{\lambda A}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ (III-37)

La densité de flux calculée avec la formule :

$\vartheta_x(x) = -\lambda[B]\{T\} = \frac{-\lambda}{L}(T_1 - T_2)$ (III-38)

III.6.Conclusion

Les modèles physiques mis en place dans le chapitre précédent permettent de prendre en compte tout les comptages entre les principaux phénomènes physiques entrant en jeux, et le passage du domaine contenu au domaine discontinu pour la résolution du problème était nécessaire.

Dans ce chapitre on a présenté les trois grandes méthodes numériques sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes d'équations aux drivées partielles, et choisie la méthode des éléments finis pour discrétise la forme générale des équations du système et l'équation de chaleur.

Dans ce chapitre nous avons présenté des résultats d'écoulement jet de plasma d'argon décharge dans l'air, et des résultats de l'étalement d'une particule goutte d'aluminium, et on s'est intéressé de présenter l'effet du substrat avec de pic. Les résultats faits à partir d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel, c'est le code ANSYS.

IV.1 ANSYS

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

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

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

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

IV.1 .2.Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux

- ✓ ANSYS DesignSpace est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces les constituants.
- ✓ ANSYS Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires : mécaniques et thermiques. Il comprend des outils de contrôle avancés tels que les options de contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, les combinaisons de solution, le post traitement de zones de contacts

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

IV.1 .3.Schéma de logiciel ANSYS

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

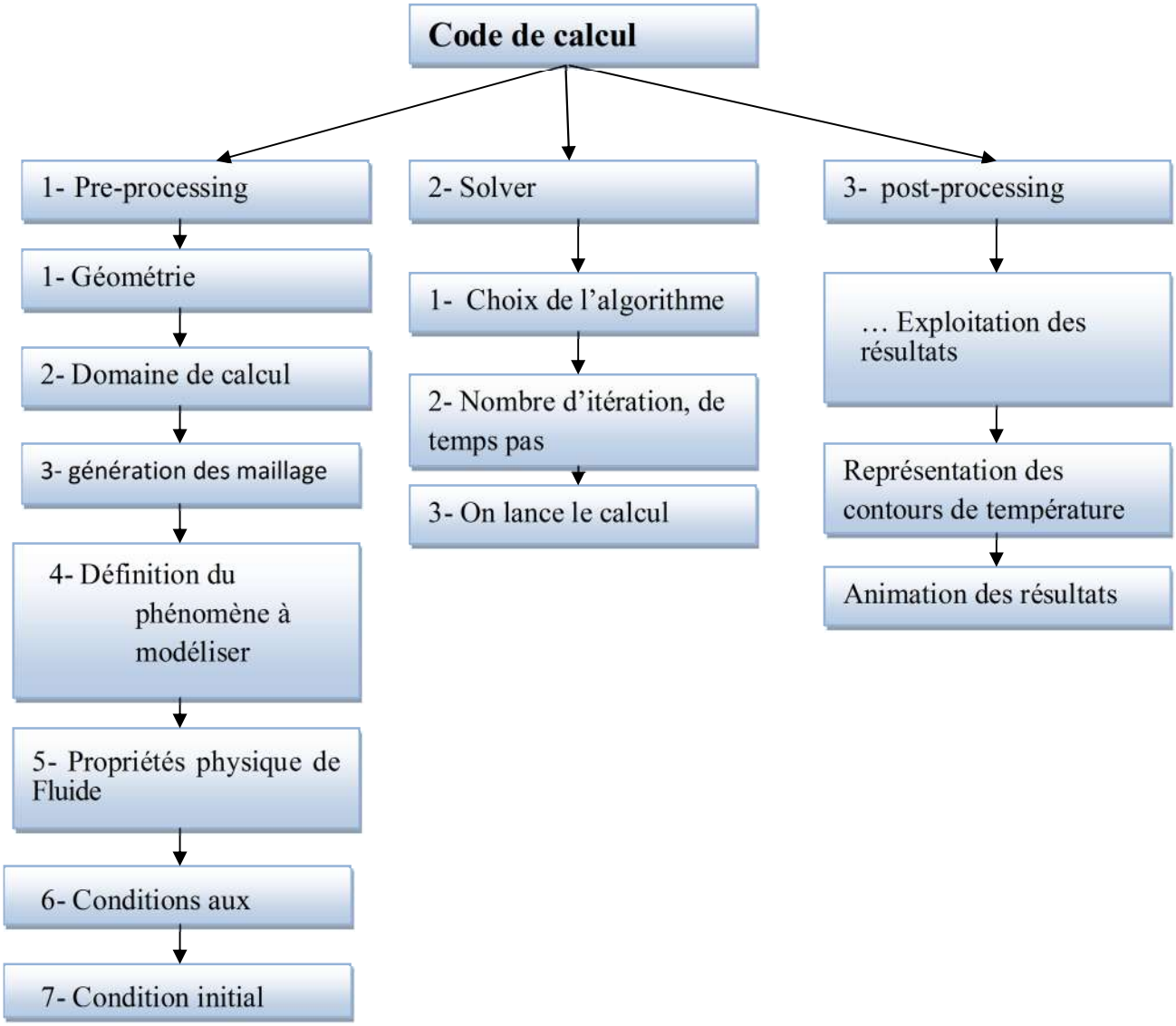


Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.2 Description du domaine d'application

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact d'une particule en aluminium déposée sur un substrat qui représente des pic surfacique cylindrique de diamètre $1.2\ 10^{-3}$ mm $0.8\ 10^{-3}$ mm et $0.6\ 10^{-3}$mm en acier.

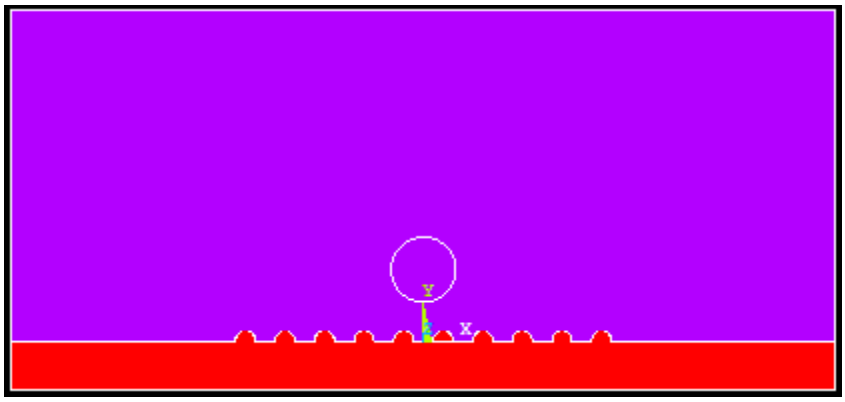


Figure (**IV.2**) Représentation schématique de domaine
D'application avec (R1=$0.6\ 10^{-3}$, R2=$0.4\ 10^{-3}$ et R3=$0.3\ 10^{-3}$) mm

IV.3 Matériaux utilisés

Dans cette étude numérique nous sommes intéressés à des particules d' aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat métalliques (acier d'outil) le choix de l'aluminium a été orienté par des nombreuses études déjà menées ,telle que les travaux expérimentaux de Minxia Xue ,Yoav Heichal ,Sanjeev Chandra et javad Mostaghimi **[65**,**66]**qui ont été consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'aluminium sur substrat en acier ;et qui sera l'objet d'identification de nos résultats.

IV.3.1 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 1,09.106 j/kg.
- une bonne résistivité électrique >1012 Ohm **[65**,**66]**
- une dureté HV sous une charge de 1N de 9,21 GPa **[65**,**66]**
- une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10 – 5mm3/Nm, à l'abrasion par une bille de Sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5 N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à 3.10-3 mm3 /Nm lorsque la température augmente à 400OC **[65**,**66]**
- une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux alcalins, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance a l'oxydation.

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

- les applications mécaniques, l'aluminium est l'abrasif le plus répandu a coté du carbure de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides. **[65,66]**
- les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion a haute températures. **[65**,**66]**
- les applications médicales ; le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie **[65**,**66]**
- les applications électriques et électroniques : l'aluminium est utilisé dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation.
- les applications optiques : les films d'aluminium permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires **[65**,**66]**

Pour l'aluminium

$\rho=2.79.10^{3}[1-4.22.10^{-5}(T-T_f)]$ (**IV.1)[67,68]**

$\mu=2.87\ 10^{-9}T\exp(2.05.10^{4}/T)$ (**IV.2)[67,68]**

Pour l'acier

$\rho=0.9246.10^{4}-1.481T+1.425(T/100)^{2}$ (**IV.1)[67,68]**

$\mu=0.3162.10^{-3}\exp(5.004.10^{3}/T)$ (**IV.2) [67,68]**

IV.3.2 propriétés des particules à l'impact

Pour l'aluminium

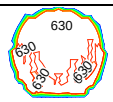
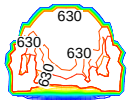
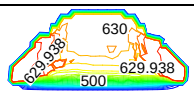
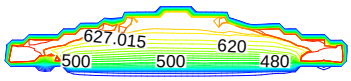
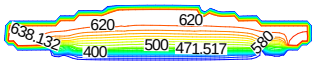
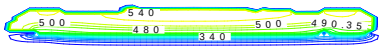
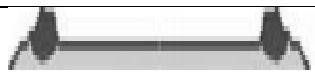
Les équations (IV.3) et (IV4) concernent, plus exactement, le fer pur mais ont été adoptées pour l'acier 316L compte tenu des valeurs voisines de densité et de viscosité entre le fer et L'acier 316L liquide .ainsi que pour le calcule numérique on a utilisé les propriétés thermo physique représentées sur le tableau IV.1

Propriétés	Alliage d'aluminium	Acier d'outil
Densité (kg/m3)	2570	7800
Température de fusion en oc	570	-
Chaleur de fusion [j/kg]	389	-
Viscosité cinématique en [m2/s]	oc 0 4.5 E-7 700 4E-7	-
Conductivité thermique liquide [W/m K]	70	-
Chaleur spécifique liquide [j/kg k]	1000	-
Conductivité thermique solide [W/m K]	°C 100 144.5 200 147.5 300 152.5 400 148	°c 27 17.6 204 23.4 427 25.1 649 26.8
Chaleur spécifique [j/kg k]	°C 300 980 400 1050 479 1150	°C 20 460 500 550 600 590

Tableau IV.1 propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. **[65]**

IV.4 Identification

Tableaux IV.2 représente les résultats de simulation de l'impact d'une particule en aluminium d'un diamètre de 3.92mm initialement à une température de 630^{o}C et une vitesse de 2.92 m/s sur un substrat en acier initialement à 200^{o}C. La gouttelette commence a se propagée à 0.1 ms, la gouttelette se propage symétriquement part rapport au point d'impact, cependant, la forme convexe abaisse la pente dans le temps en glissant lentement sur le substrat jusqu'à l'étalement totale, il faut noter que le liquide suit la topographie de la surface,

T=0.1 ms		
T=0.3		
T= 0.7ms		
T=2ms		
T=3ms		
T=7ms		

Tableaux IV.2 impact séquentiel d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 2.9m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C le temps d'étalement t=7ms.

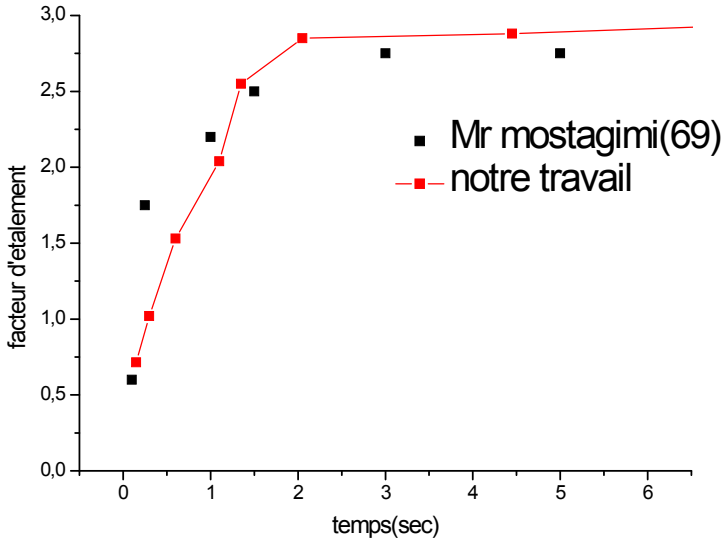
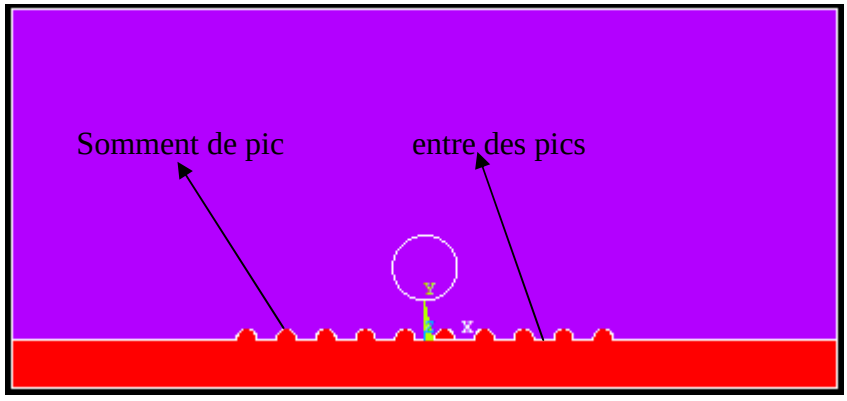


Figure IV 3 F acteur d'étalement

La figure IV 3 présente une comparaison des facteurs d'étalement de l'impact dans le temps pour les mêmes conditions de l'expérience réalisée par Mr .j Mostaghimi [69] et notre travail On peut constater que le comportement dynamique de la gouttelette dans l'ensemble donne un bon accord à celui des résultats expérimentaux.

En vue de l'étude de l'influence de la présence des pics surfacique sur substrat nous avons proposé trois pics cylindrique de différents diamètre (1.2 10^{-3}et 0.8 10^{-3}et0.6 10^{-3}mm) et pour chacun nous avons :

- Représente les variations du facteur d'étalement par rapport au temps.
- Représente les variations des pressions d'impact à deux point par rapport au temps voir (figure).
- Représente les variations de température pour quatre positions dans le substrat et cela par rapport au temps.



IV.4.1.La première expérience.

La figure IV.4 représente la dynamique conjuguée au champ de température pendant l'étalement d'une (gouttelette) sur substrat présente des pics de diamètre 1.2 10^{-3} mm et une température de substrat de 200 °C. Où le modèle numérique a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard, ainsi que la topographie cylindrique de substrat à favoriser la déviation des doigts à l'extrémité de la lamelle ce qui provoque la création des poches d'air.

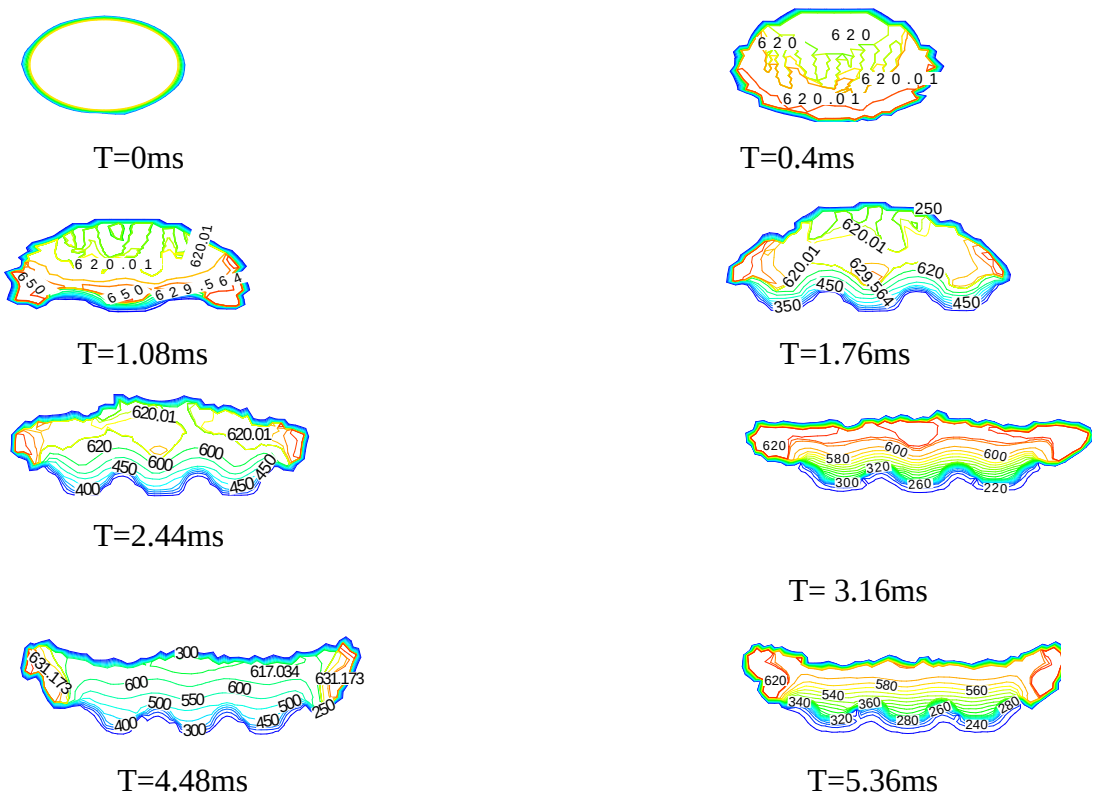


Figure IV.4 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre, pic surfacique de substrat diamètre 1.2 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s le temps d'étalement t=5.36ms c'est bon résultat.

La figure IV.5 compare le facteur d'étalement de la goutte d'aluminium dans le modèle proposé substrat lisse et sur substrat avec des pics.

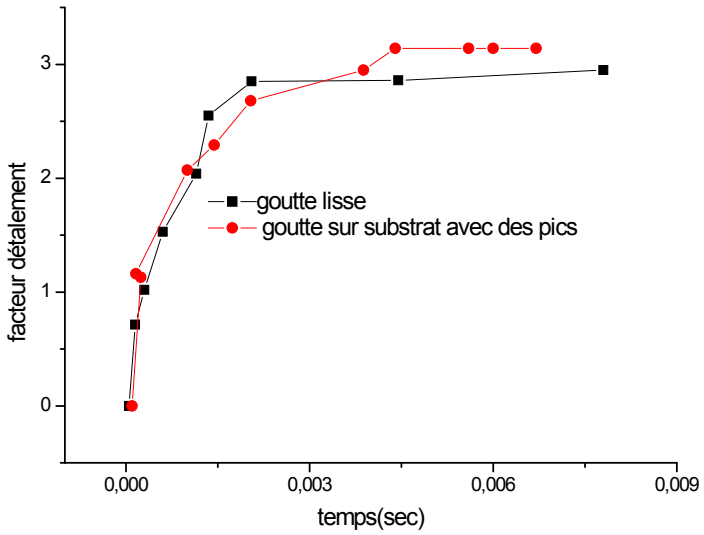


Figure IV.5 facteur d'étalement des deux cas

L'étalement des deux gouttes est très faible, cette faiblesse du au glissement très important de la particule sur substrat avec des pics diamètre 1.2 10^{-3}mm, à t=4.5ms les facteurs d'étalement des deux goutte stabilise, pour substrat lisse il se stabilise et prend la forme de l'étalement final avant la goutte sur substrat avec des pics.

La figure IV.6 Représente les résultats numérique des profiles de pression au deux point $\mathbf{p_1}$ présente le sommet de pic et $\mathbf{p_2}$ présente le substrat, initialement la pression est plus élève au point de substrat par rapport sommet de pic max de pression ces **p=45000(Pas)** qui produit une faible résistance de contact pour la forme présente sommet de pic et substrat puis elle se désintègre vers zéro très rapidement pour le substrat avant le sommet de pic.

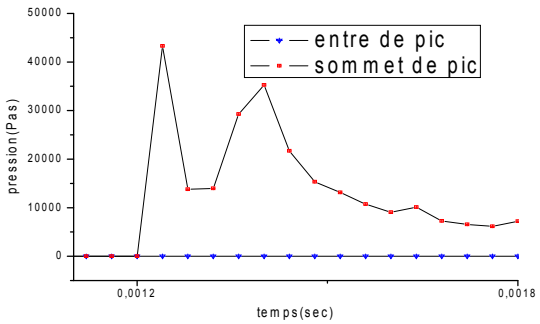


Figure IV.6 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les Deux position de diamètre 1.2 10^{-3}mm.

Les Figures IV.7- IV.8 représentent les profiles de température pour les positions dans le substrat respectivement pour la goutte **présente sommet de pic** et **substrat**

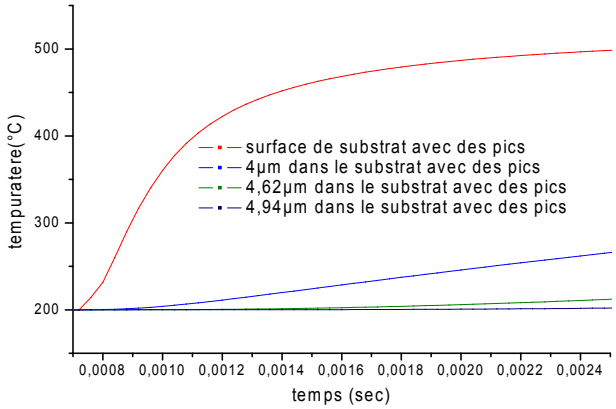


Figure IV.7 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 1.2 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente sommet de pic.

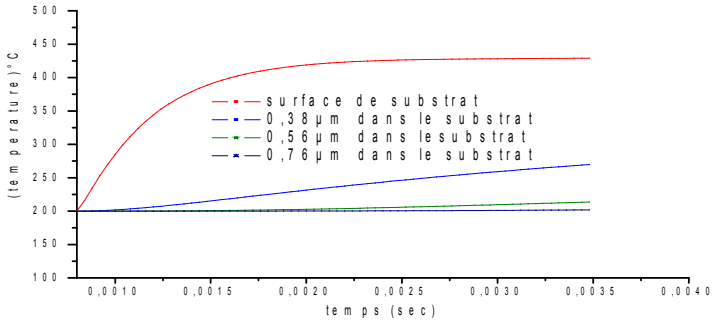


Figure IV.8 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 1.2 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule substrat.

Les figures IV.7, IV.8 montrent l'apparition des zones de bon et de mauvais contact a l'interface sommet de pic/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 sommet de pic le temps t=3ms pour démarier la stabilisation, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement. Puis suite à un étalement partiel, la température de substrat n'augmente que celle de la surface.

IV.4.1.1 .La deuxième expérience.

La figure IV. 9 représente la dynamique conjuguée au champ de température pendant l'étalement d'une (gouttelette) sur substrat présente des pics de diamètre 0.8 10^{-3} mm et une température de substrat de 200 °C. Où le modèle numérique a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard, ainsi que la topographie cylindrique de substrat à favoriser la déviation des doigts à l'extrémité de la lamelle ce qui provoque la création des poches d'air.

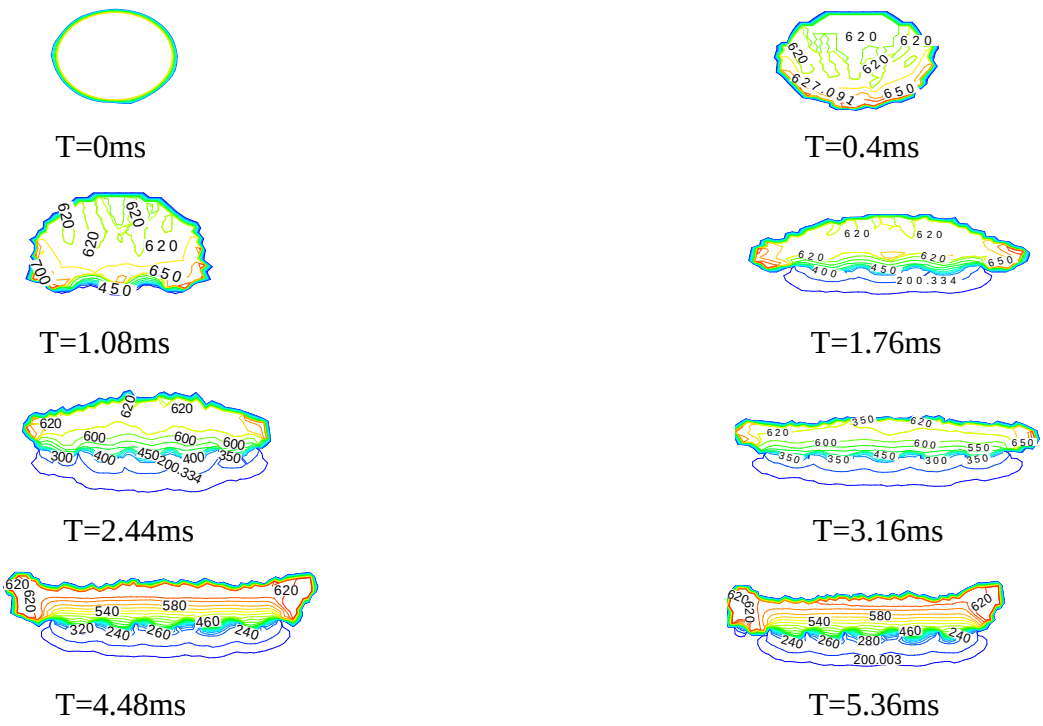


figure IV.9 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat diamètre 0.810^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s et temps d'étalement t=5.36ms.

La figure IV.10 le facteur d'étalement de la goutte d'aluminium dans le modèle proposé substrat lisse et substrat avec des pics.

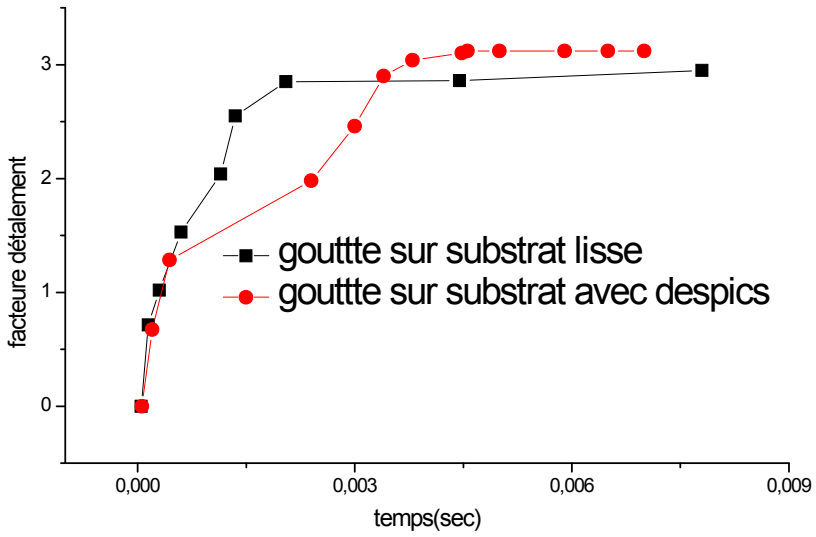


Figure IV.10 facteur d étalement des deux cas

L'étalement des deux goutte est le même au cours de l'impacte jusqu'à l'instante t=4.5ms, la pour goutte substrat lisse il se stabilise et prend la forme de l'étalement final par contre pour la goutte sur substrat présente des pics a cause du au glissement très important de la particule.

La figure IV.11 représente les résultats numérique des profiles de pression au deux point de contact, nous remarquons aussi, initialement la pression est plus élevé au point de substrat par rapport le point de sommet de pic la pression dépèces maximum **70000Pas** qui produit une grand résistance pour la forme présente puis elle se désintègre vers zéro très rapidement pour le substrat avent le sommet de pic.

-comme nous lavons déjà dit, à cause de la bulle d'air, mais l'augmentation suivante importante par rapport au substrat diamètre **1.2 10^{-3}mm**.

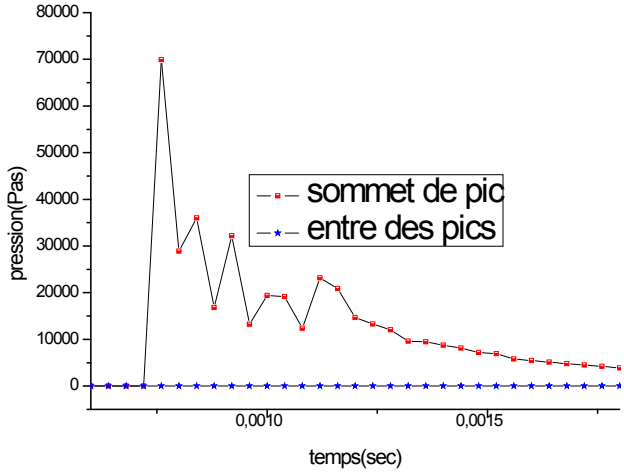


Figure IV.11: Résultats de simulation pour les profiles de Pression au deux point d'impact dans les diamètres 0.8 10^{-3}mm

Les Figures IV.12 - IV.13 représentent les profiles de température pour trois position dans le substrat respectivement pour la goutte et présente sommet de pic

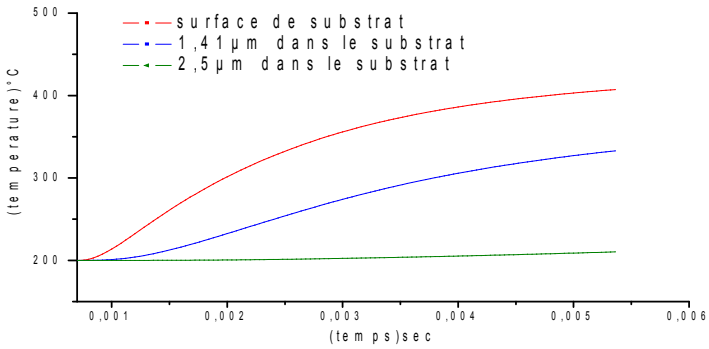


Figure IV.12 profiles de température dans le temps pour trois positions diamètres 0.8 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente sommet de pic totalement fondue.

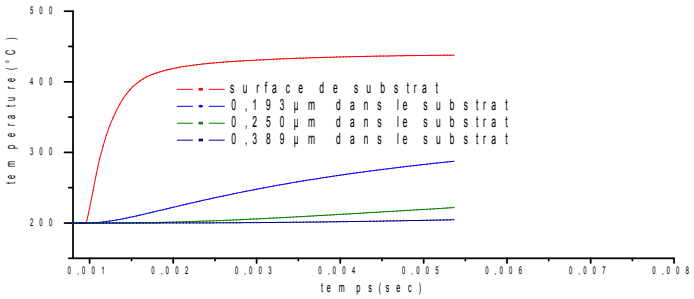


Figure IV.13. Profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 0.8 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des substrats totalement fondue.

Moins importante que dons un substrat diamètres à 1.2 10^{-3}mm. Cela est peut être causé par le glissement de la particule.

On notre que la température de substrat augmente rapidement et stabilises vers zéro par a pour le sommet de pic retard pour quatre positions mais manière moins importante que dons un substrat diamètre 0.8 10^{-3}mm.

IV.4.1.1 La troisième expérience.

La figure IV. 13 représente la dynamique conjuguée au champ de température pendant l'étalement d'une (gouttelette) sur substrat présente des pics de diamètre 0.6 10^{-3} mm et une température de substrat de 200 °C. Où le modèle numérique a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard, ainsi que la topographie cylindrique de substrat à favoriser la déviation des doigts à l'extrémité de la lamelle ce qui provoque la création des poches d'air.

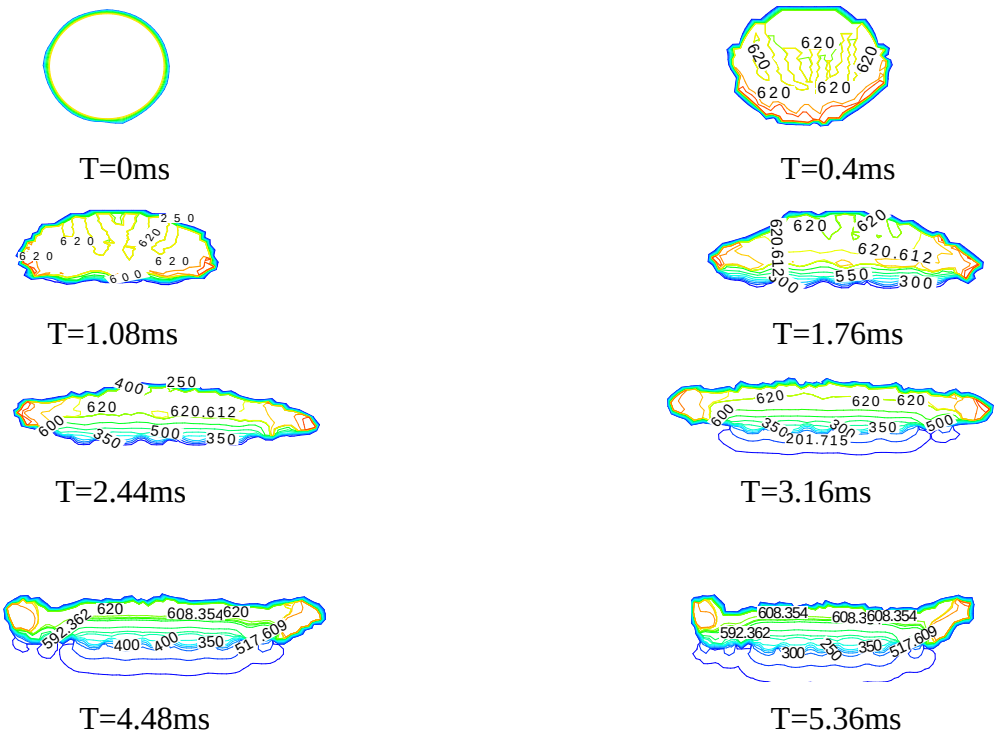


figure IV.14 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat diamètre 0.6 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s le temps t=5.36ms.

La figure IV.15 compare le facteur d'étalement du aluminium dans le modèle propose normale et présente pics surfacique de substrat

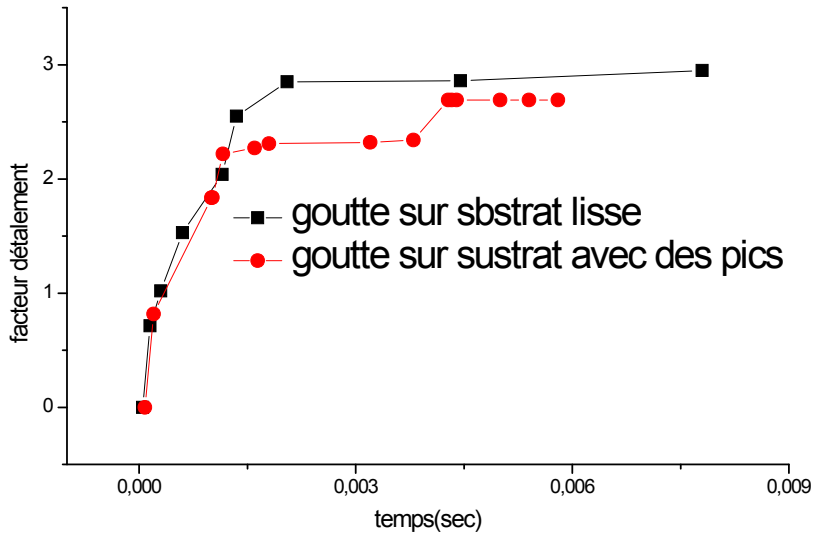


Figure IV.15 facteur d'étalement des deux cas.

L'étalement des deux goutte est le même au cours de l'impacte jusqu'à l'instante t=4.5ms, la pour goutte substrat lisse il se stabilise et prend la forme de l'étalement final par contre pour la goutte sur substrat présente des pics cette faiblesse du au glissement très important de la particule.

La figure IV.16

Représente les résultats numérique des profiles de pression au deux point de contact, nous remarquons aussi, initialement la pression est presque le même entre les deux la pression dans le substrat dépèces maximum **90 KPas** par rapport le point de sommet de pic la pression dépèces maximum **60KPas** qui produit une grand résistance pour la forme présente puis elle se désintègre vers zéro très rapidement au même temps.

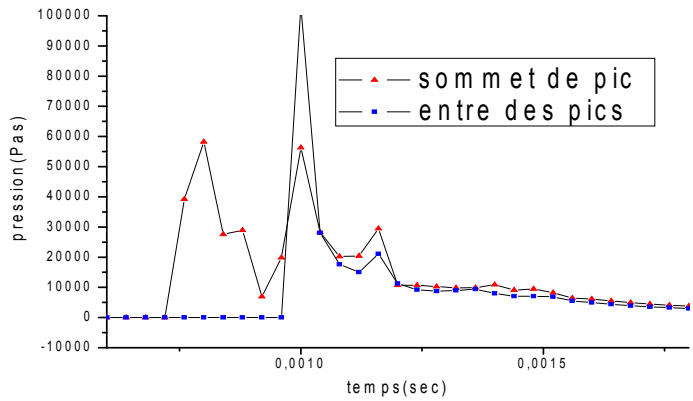


Figure IV.16 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux positions des diamètres 0.6 10^{-3}mm

Les Figures IV.17 - IV.18 représentent les profiles de température pour quatre position dans le substrat respectivement pour la goutte et présente sommet de pic et substrat

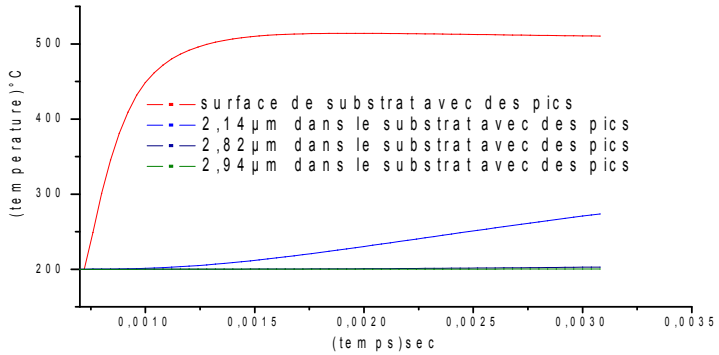


Figure IV.17 : profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 0.6 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente sommet de pic totalement fondue.

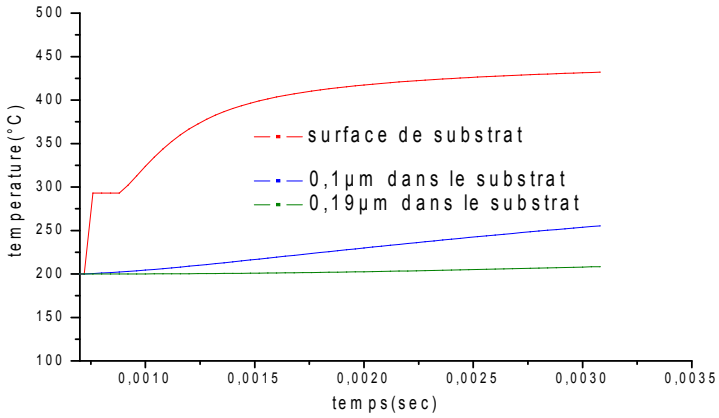


Figure IV.18: profiles de température dans le temps pour quatre positions diamètres 0.6 10^{-3}mm à 200 C° pour une particule présente des substrats totalement fondue.

On remarque que la température de deux cas presque le même mais on un put déférence, l'augmentation c'est rapide dans le cas de substrat à t= 1.25ms contrairement à la goutte présente de sommet des pics cela est probablement du au glissement de la goutte substrat qui est pouls rapide que la goutte présente sommet de pic.

Figure IV.18 On constat également que la température de la goutte (présente sommet de pic et substrat) est plus faible que dans le substrat diamètre a 0.8 10^{-3}mm, expliquée toujours par un glissement plus important

IV.5 comparaisons des résultats

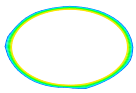
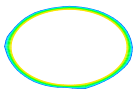
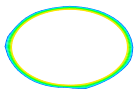
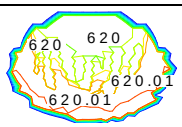
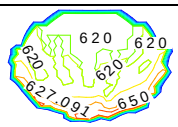
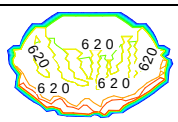
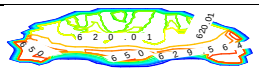
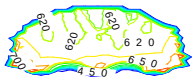
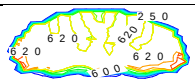
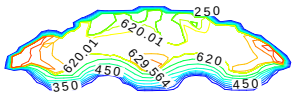
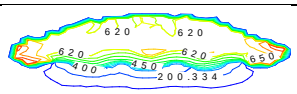
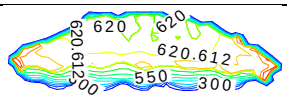
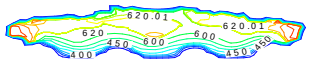
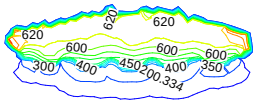
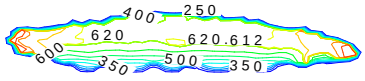
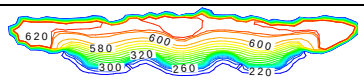
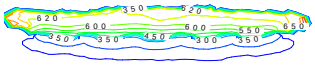
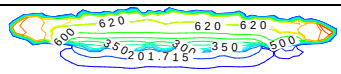
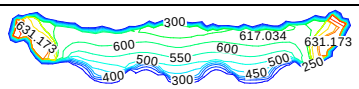
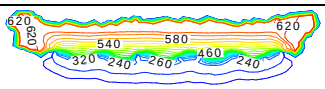
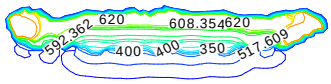
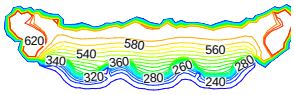
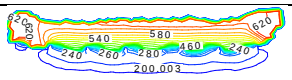
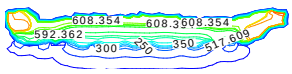
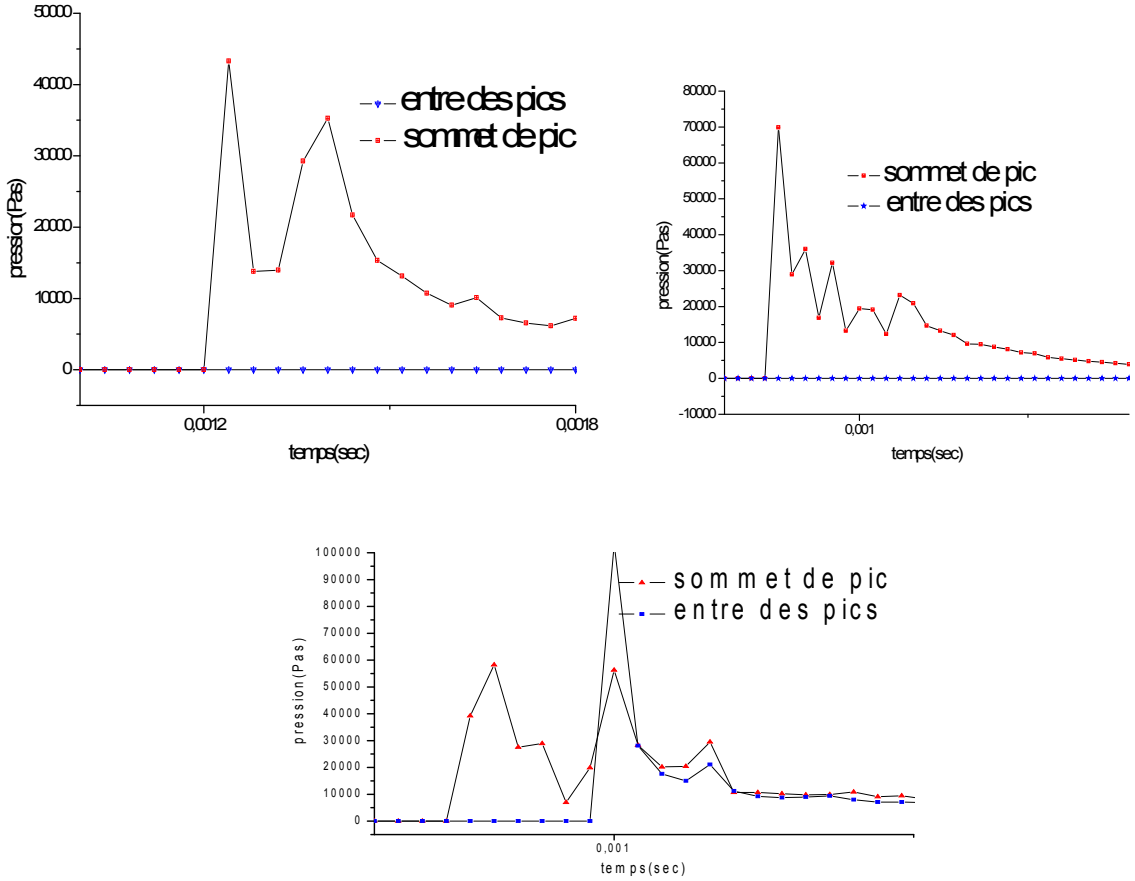
	R=0.0006mm	R=0.0004mm	R=0.0003mm
T=0ms			
T=0.4ms			
T=1.08ms			
T=1.76ms			
T=2.44ms			
T=3.16ms			
T=4.48ms			
T=5.36ms			

Figure IV.19 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte D'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur substrat avec des pics de diamètre 1.2 10^{-3} et 0.8 10^{-3}et0.6 10^{-3} mm à 200°C avec une vitesse de 2.9m/s.



La figure IV.21: Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux positions des trois déférentes diamètres

Nous remarquons que les profiles de pression des trois déférentes cas de diamètres et pour les trois points d'impact de chaque cas nous constatons que les deux premier cas (D=1.2 10^{-3} mm et D=0.8 10^{-3} mm) la pression est toujours nul ce qui explique le non accrochage mécanique .par contre, pour le troisième cas (D= 0.610^{-3} mm) la pression d'impacte est de 100 KPas et qui favorise bien l'accrochage mécanique au niveau de l'espace inter-aspérité.

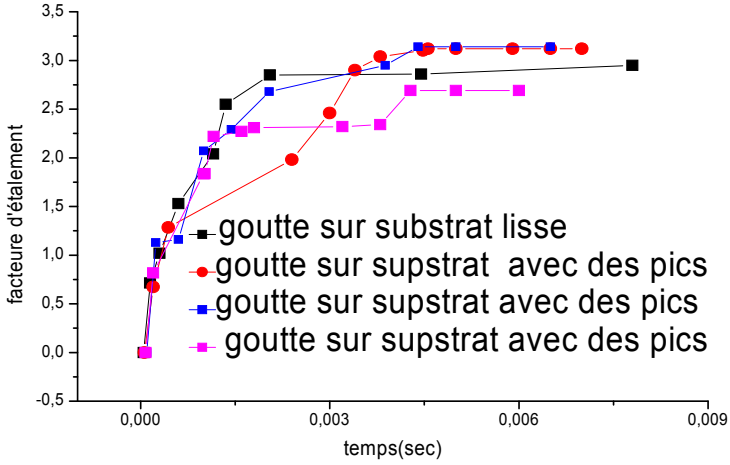


Figure IV.21 facteur d'impacte dans chaque forme pour les trois cas

Nous remarquons que les deux diamètres D_1et D_2 on constat un bon étalement, traduit par un coefficient d'étalement supérieur à celui de cas référence (substrat lisse), par contre pour le troisième diamètre l'étalement est qualitativement faible, que l'on peut voir par le faible facteur d'impact.

-Notez la distribution de la température grâce à l'influence de l'atterrissage d'aluminium chaque fois une période de temps écoulé a augmenté de glisser dans une stabilité très, l'effet varie en fonction de la longueur du diamètre

-Les résultats numériques ont montré que la forme de la goutte joue un rôle important pour son étalement, le déférente de diamètre du pic surfacique de substrat a une plus importante. Plus le pic surfacique de substrat est glissement de la goutte est important ce qui provoque la grande du facteur d'étalement caractérisé par un défaut de contact entre les lamelles se manifestons par des fissures ou mauvais dépôt.

IV.6 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 sur substrat présente des pics de diamètre sur la formation des lamelles pour une goutte **présente sommet de pic** et **entre de pic.**

- ✓ 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 sur substrat présente des pics de diamètre.
- ✓ Un substrat diamètre à$0.6\ 10^{-3}$mm est meilleur pour obtenir un bon dépôt par rapport à $1.2\ 10^{-3}$et 0.810^{-3} mm.

Conclusion générale

L'étalement de 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 et par simulation numérique base sur la méthode des EF/VOF, on à étudier les phénomènes de l'empilement des couches en vue de la réalisation d'un dépôt d'aluminium ainsi que les phénomènes reliées à l'impact et l'étalement de goutte sur substrat présentant des pics cylindrique de différents diamètres.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié la projection thermique, ses paramètres et ses caractéristiques, nous avons été appelés également à étudier la solidification de la lamelle suite à son étalement après l'impact qui confère différent caractéristiques aux dépôts.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les équations des modèles dynamique et thermique. La configuration du domaine à été choisie en 2D cartésien.

Nous avons consacré le troisième chapitre à la résolution numérique et les méthodes de calcule.

Dans le dernier chapitre, les simulations sont réalisées en 2D cartésien afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, les résultats obtenus montrent que :

Les aspérités selon qu'elle soit joue un rôle important sur la morphologie de la lamelle.

- L'impact d'une goutte sur substrat représentant des pics provoque le phénomène de rebonds pour des diamètres des pics inferieur à 0.6 10^{-3}mm par contre le glissement est favorable pour des diamètres des pics entre 1.2$10^{-3}$ mm et0.8$10^{-3}$ mm.
- La pression d'impact augmente conformément à la norme sur les sur face des pics pour tous les cas, et pour la surface entre les pics on constats que la pression est conformément à la norme pour le cas de diamètre 0.6 10^{-3}mm par contre la pression est nul pour les autre cas.
- Les diamètres des pics inferieur ou égale à 0.6 10^{-3}mm favorise l'accrochage mécanique, et contrairement pour les diamètres supérieur.

Un substrat diamètre à 1.2 10^{-2}mm mayeur l'étalement, la pression la température de la goutte ces remarques sont plus importantes pour la goutte présente substrat des pics. Suite à ce travail il serait intéressant d'étudier.

Reference

[1] :*http://www.iso.org/iso/search.htm?qt=iso+14044&searchSubmit=Search&sort=rel&type=simple&published=on, Janvier 2011.*

[2]: L. Grisel , P. Osset «L'analyse du cycle de vie d'un produit ou d'un service-Applications et mise en pratique», AFNOR ,2004.

[3] : 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.

[4] : http://www.industrie.com/it/environnement/familiarisez-vous-avec-l-acv.11178, 2011.

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

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

[7]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).

[8]A. Vardelle, C. Moreau, P. Fauchais, MRS Bull. July 32–7, (2000).

[9]N. Venkatramani, Industrial plasma torch and application, Current sciences, 83 (3), p 254-262, (2002).

[10]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)

[11] :B. Pateyron, G. Delluc, Logiciel TTWinner, ADEP Banque de données de l'Université de Limoges et du CNRS. (Ed.) Direction des bibliothèques, des Musées et de l'Information Scientifique et technique, France (1986), téléchargeable sur le site http://www.unilim.fr

[12]:R. Spores, E. Pfender, Flow Structure of a turbulent thermal plasma jet, Surface & Coatings Technology, 37, pp 251-270 (1989)

[13] 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.

[14]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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] A. Vardelle, C. Moreau, P. Fauchais, Deposit formation dynamics, MRS Bulletin, 2000, July, pp 32-37.

[18] 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

[19] 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.

[20] Syed Asif Ansar, Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc; thèse de doctorat de l'université de limoges

[21] 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 Spray Technology, 4 (1), 1994, pp 50-58.

[22] 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.

[23] 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.
[24] 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.
[25] 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 Research, (ed.) C.C. Brendt, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2000, pp 759-765.
[26] J. Madjeski Solidification of Droplets on a Cold Surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp.1009-1013.
[27] S. Chandra, P. Fauchai Formation of solid splats during thermal spray deposition. Journal of Thermal Spray Technology, 18 (2), 2009, pp. 148-180.
[28] M. Vardelle, A. Vardelle, A. C. Léger, P. Fauchais, D. Gobin Influence of Particle Parameters at Impact on Splat Formation and Solidification in Plasma Spraying Processes. Journal of Thermal Spray Technology, 4 (1), 1995, pp.50-58.
[29] 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.
[30] 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.
[31] 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.
[49] G. Antou, G. Montavon, F. Hlawska, A. Cornet, C. Coddet Exploring Thermal Spray Grey Alumina Coating Pore Network Architecture by Combining Stereological Protocols and Impedance Electrochemical Spectroscopy. Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, Seattle, USA, (Ed.) B.R. Marple, M.M. Hyland et al., (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD Rom, 7 p.
[31] Y.M. Yang, C. Coddet and M. Imbert, Numerical modeling and simulation of particule behaviours in an HVOF supersonic flow. Proc. of the 15th Int. Thermal Spray Conf. 25-29 May 1998, Nice, France

[32] 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.
[33] 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
[34] 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
[35] 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.
[36] N. A. Hussary, J. Heberlein, Investigation of arc Behavior and Particle Formation in the Wire Arc Spray Process Using High Speed Photography: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.)ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp737-742.
[37] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, J.C. Labbe, P. Fauchais, Influence of Substrate surface Oxidation Stage on the Morphology and Flattening of Splats, Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Plasma Processes, July 2002, Strasbourg, France, Begel house.
[38] X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Shrouded CO2 Atomization on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park,Ohio,USA,(1995),pp31-37.
[39] Site Internet de Gordon England: www.gordonengland.co.uk
[40] 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
[41] 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
[42] 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.
, [43] 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.

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

[45] 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

[46] 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 de l'Université de limoges, 1995

[47] 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

[48] 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

[49] 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

[50] 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

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

[52] 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

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

[54] 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

[55] 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

[56] 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

[58] 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-

[59] 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

[60] 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

[61] 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

[62] 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

[63] 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

[64] 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

[65]M . pasandideh –fard,s,D.aziz,S Chandra ,javad.mostaghimi numerical simulation of thermal spray coating formation ,in proceeding of the 1 st international thermal spray conference, montreal,quebec,may 8-11.

[66]pershin ,I.Thomson ,S.chandra,J.mostaghimi,splashing of nickel droplets during plasma spraying, in thermal spray :surface engineering via applied research.

[67]R.C.Dykhyizen,review of impact and solidification of molten thermal spray droplets ,J.thermal spray technology,3(4),1994,pp351-61.

[68]P.Chraska ,J.Dunsky,K.neufuss,J.Pisacka,thermal spray technology,6(3),1997,pp320-626

[69]Ghafouri-Azar R.Shakeri S.Chandra S.and **mostaghimi j**.(2002) “Numerical S imulation of offset Deposition for Sequential Tin Droplets “, proc .of Int .Thermal Spray Conference Essen , E .Lugsheider(ed), DVS Dusseldorf,Germany,pp.972-978.