REPUBLIQUE **A**LGERIENNE **D**EMOCRATIQUE & **P**OPULAIRE
Ministère **D**e **l'**Enseignement **S**upérieur
Et de la **R**echerche **S**cientifique
UNIVERSITE Dr -YAHIA FARES de MÉDÉA



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de la matière
Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master
En Génie mécanique
Option: Energétique et thermique des systèmes

THEME

ANALYSE NEMURIQUE DE L'IMPACT DE PARTICULE D'ALUMINUIM SUR SUBSTRAT D'ACIER EN PRESENCE DE COUCHE D'OXYDE

Présentée par :

HIBA CHARRIF

Proposé et dirigé par :

- Dr ZIRARI Mounir

Promotion 2015/2016

Remerciement

Tout d'abord, louange à Allah qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

J'adresse mes chaleureux remerciements à Mr : ZIRARI MONIR pour m'avoir facilité mon travail, pour son aide, sa disponibilité, sa patience et ses conseils.

Je remercié tous les enseignants d'Université de Médéa, particulièrement les enseignants du département de Génie mécanique.

Enfin, j'adresse aussi mon remerciement à tous ceux qui ont contribué à mon formation de près ou de loin, depuis les premières lettres d'alphabet.

A la mémoire de mon père



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 mes très chères frères Mohamed, Badis et Imad.

À mes très chères sœurs Karima, Amina, zhor, dalal, lila, Elhadja.

À tous mes amés Abir, Ghaniya, Nabila, et Faiza.

À tout mes collègues de la promotion 2015/2016.

Enfin À toute personne qui a contribué de prés

ou de loin à la réalisation De ce modeste travail.

Je le dédie à mon promoteur

Mr ZIRARI MOUNIR pour sa grande patience.

HIBA

Résumé

Dans ce mémoire on à étudié numérique par la méthode EF/VOF, l'impact et l'étalement de gouttelette d'aluminium sur substrat d'acier, en présence de couche d'oxyde.

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

Le modèle d'impact estime la dynamique d'écoulement et le passage lors de l'impact (d'étalement et de la solidification de la goutte)a l'aie du la méthode (VOF)couplé a un modèle de solidification..

Mot clés :

- I'impact,goutte,oxydation,substrat,métal,solidification,lamelle,simulation numériqur,élément finis ; VOF ;Ecoulement ;Modélisation, ANSYS.

Abstracts

In this memory is in digital studied by the RU / VOF method, impact and aluminum droplet spread on steel substrate in the presence of oxide layer.

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

influence of the oxide layer on the morphology of the spreading and training of slats as well as the properties of deposits, particularly their adhesion to the substrate.

The impact model considers the flow dynamics and the passage on impact (spreading and solidification of the drop) ale of the method (VOF) coupled to a solidification model.

Keywords:

• I ‘impact, gout, oxidation, substrate metal solidification, strip, numériqur simulation, finite element; VOF; flow; modeling, ANSYS.

ملخص

في هذه الأطروحة درسنا إلى النظام الرقمي من قبل EF / طريقة VOF، وتأثير والألمنيوم قطرة تنتشر على الركيزة صلب في وجود طبقة أكسيد،

يمكن التسخين من ركائز معدنية من طائرة البلازما تحت الغلاف الجوي المحيط يسبب أكسدة السطح، والتأثير على خصائص ترسب التصاق أساسا إلى ركائز وقد تبين أن الأنواع المؤكسدة في الطائرة، والتي من الغلاف الجوي حول سطح الركيزة تعزيز الأكسدة ترتبط خصائص طبقة أكسيد لطبيعة الركيزة، بيئته، وكذلك لسرعة ودرجة الحرارة و الوقت التسخين أكسدة الركيزة قد يغير الخصائص الحرارية، البنية البلورية وخشونة السطح وقد أعلن عن هذه المعلمات الآثار على صفحات نشر لهذا العمل ونحن نقدم دراسة رقمية للتأثير على طبقة الأكسيد على التشكل من نشر وتدريب الشرائح فضلا عن خصائص ودائع، وخاصة على التصاق إلى الركيزة

بالإضافة إلى (VOF) ويعتبر نموذج تأثير ديناميكيات التدفق والمرور على الأثر (نشر وترسيخ الانخفاض) مزر للطريقة نموذج التصلب

الكلمات الأساسية:

• تأثير، قطرة، الأكسدة، تصلب، الركيزة، المعدن، صفيحة، والمحاكاة العددية، العناصر المحدودة. VOF، تدفق، النمذجة، ANSYS

LISTE DES FIGURES

Figure I-1	Schéma de principe de la projection thermique	**4**
Figure I-2	Caractéristiques des différents procédés de projection thermique	**5**
Figure I-3	Schéma de principe d'un pistolet flamme	**6**
Figure I-4	Schéma d'un pistolet flamme fil	**7**
Figure I-5	Schéma du procédé HVOV	**8**
Figure I-6	Schéma de fonctionnement du canon à détonation	**9**
Figure I-7	Schéma du procédé arc fil	**10**
Figure I-8	Schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.	**11**
Figure I-9	Principe de fonctionnement de projection plasma	**11**
Figure I-10	Torche plasma à arc transféré	**12**
Figure I-11	Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma.	**12**
Figure I-12	Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé	**13**
Figure I-13	Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes	**14**
Figure I-14	Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes.	**14**
Figure I-15	Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes	**15**
Figure I-16	Schéma des différents modes d'injection du gas plasmagènes dans une torche de projection plasma.	**16**
Figure I-17	Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé	**18**
Figure I-18	Schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)	**19**
Figure I-19	Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique	**20**
Figure I-20	Schéma d'écrasement de la particule	**21**
Figure I-21	Effet des techniques de projection sur le contenu des oxydes et porosité.	**24**
Figure I–22	Lamelles d'alumine sur une couche d'oxyde Fe2O3 obtenue par peroxydation d'un substrat XC38 au four sous air avec rupture et délaminage de la couche d'oxyde.	**25**
Figure I–23	Couche de FeO obtenue sous atmosphère de CO2 à 1000 °C pendant 45 min	**25**

LISTE DES FIGURES

Figure I–24	Epaisseur de la couche d'oxyde à la surface des substrats préchauffés dans différentes conditions.	**26**
Figure I–25	Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette	**27**
Figure I-26a	écrasement de particules sur des aspérités.	**28**
Figure I-26b	processus du dépôt.	**28**
Figure III-1	l'approche de ligne de courant d'upwind.	**51**
Figure III-2	bilan thermique.	**53**
Figure III-3	(a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique.	**55**
Figure III-4	Présentation des méthodes de calcul d'interface a)méthode Lagrangienne, b) méthode Eulérienne.	**56**
Figure III-5	Différentes méthodes de suivi de front a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau.	**57**
Figure III-6	Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque (a) Méthode MAC, (b) schéma TVD et (c) Méthode VOF d'ordre 2.	**58**
Figure III-7	Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique.	**58**
Figure III-8	Changement de topologie de l'interface dans "level set ".	**59**
Figure IV-1	Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS.	**60**
Figure IV-2	configuration géométrique et conditions d'étalement de l'identification	**63**
Figure IV-3	Facteurs d'étalement.	**64**
Figure IV-4	Schéma représentant le contact lamelle/substrat après l'oxydation de la Surface.	**65**
Figure IV-5	Représentation schématique de domaine.	**66**
Figure IV-6	Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 0.1mm.	**67**
Figure IV-7	Facteur d'étalement pour le cas d'une épaisseur de 0.1mm.	**67**
Figure IV-8	profiles de température avec le temps dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 0.1mm.	**68**
Figure IV-9	la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 0.1mm.	**69**
Figure IV-10	Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 0.3mm.	**70**

Figure IV-11	Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 0.3mm.	**70**
Figure IV-12	profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 0.3 mm.	**71**
Figure IV-13	la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 0.3mm.	**71**
Figure IV-14	Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 0.5 mm.	**72**
Figure IV-15	Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 0.5 mm.	**73**
Figure IV-16	profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 0.5 mm.	**73**
Figure IV-17	la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 0.5mm.	**74**
Figure IV-18	Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 1mm.	**75**
Figure IV-19	Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 1mm.	**75**
Figure IV-20	profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 1 mm.	**76**
Figure IV-21	la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 1mm.	**77**
Figure IV-22	Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 1.5 mm.	**78**
Figure IV-23	Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 1.5mm.	**78**
Figure IV-24	profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 1.5 mm.	**79**
Figure IV-25	la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 1.5 mm.	**79**
Figure IV-26	facteurs d'étalements des cinq cas étudié.	**80**
Figure IV-27	l'évolution des températures des cinq cas étudié.	**81**
Figure IV-28	pression a l'interface des cinq cas.	**82**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II–1	la décomposition de Reynolds dans les équations de Navier Stokes	36
Tableau II-2	les constantes du modèle ASM	39
Tableau III-1	expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables	49
Tableau IV-1	Les prospérités des mâtereaux utilisés	62
Tableau IV-2	impact séquentiel d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C le temps d'étalement t=7ms	64
Tableau IV-3	Propriétés thermique de Fe_2O_3 utilisé dans les calculs	65

NOMENCLATURE

Lettres latines

Notation	Signification	Unité
a	Diffusivité thermique	$[m^2.s^{-1}]$
Cp	Capacité calorifique massique à pression constante	$[m^2.s^{-2}.K^{-1}]$
D	Diamètre de goutte	[m]
d_R	Distance entre deux gouttes voisines	[m]
d_i	Diamètre initial de goutte	[m]
E_c	Energie cinétique	[N.m]
E_p	Energie potentielle	[N.m]
f_s	Fraction solide	
Fo	Nombre de Fourier thermique	
g	Accélération de pesanteur	$[m.s^{-2}]$
h	Hauteur de goutte	[m]
H	Enthalpie	[J]
K	Nombre de Sommerfeld	
m	Masse	[Kg]
Oh	Nombre d'Ohnesorge	
Pe	Nombre de Peclet	
Pr	Nombre de Prandtl	
r	rayon de goutte	[m]
Ra	Nombre de Rayleigh	
Re	Nombre de Reynolds	
R_{th}	Résistance thermique de contact	$[K.m^2.W^{-1}]$
S^{E}	Terme source ou puits changement de phase	$[W.m^{-3}]$
Ste	Nombre de Stefan	
T	Température	[°K]
T	Temps	[s]
V_i	Composante de la vitesse instantanée suivant i	$[m.s^{-1}]$
V	Volume	$[m^3]$
V_i	Vitesse d'impact	$[m.s^{-1}]$
V_{refr}	Vitesse de refroidissement en DSC	$[K.m_{ref}.min^{-1}]$

NOMENCLATURE

ő	Nombre de Weber	
$Š_ı$	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]
Ø	Variable généralisée	
Ň	Coefficient d'advection transitoire	
$Γ_Ø$	Coefficient de diffusion	
ρ	masse volumique	$[kg.Ř^{-3}]$

Abréviations

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

SOMMAIRE

Résume

Liste des Figures

Liste des Tableaux

NOMENCLATURE

SOMMAIRE

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction générale…….. 1

I.1.La projection thermique ……... ……. 3

I.1.1. historique ……..... 3

I.2 .Technique de projection thermique ……..... 4

I.2.1 .Projection par la flamme ……..... 5

I.2.1.1 La projection flamme –poudre ……..... 5

I.2.1.2.La projection flamme-fil ……..... 6

I.2.1.3. La projection flamme de cordons flexibles…… 7

I.2.1.4.La projection supersonique par combustion …… 8

I.2.1.5.Le canon à détonation ……..... 9

I.2.2. La projection par arc électrique……..... 10

I.2.2.1. La projection arc-fil ……..... 10

I.2.2.2. La projection par plasma d'arc soufflé ……..... 10

I.2.3 La projection plasma ……..... 11

I.2.3.1. Principe ……..... 11

I.2.3.2. fonctionnement de la torche à plasma d'arc …… 12

- Torche à arc transféré
- Torche à arc souffle

I.2.3.2.1. Amorçage de l'arc ……..... 13

I.2.3.2.2.Le gaz plasmagène ……..... 13

I.2.3.2. 3. Injection des gaz ……..... 15

- Injection axiale
- Injection radiale
- Injection en vortex

I.2.3.3. Formation du jet plasma ……..... 16

I.2.3.4. Ecoulement du jet plasma ……..... 17

SOMMAIRE

I.4. Traitement des particules dans le jet plasma …….. 18
I.4.1 Injection de la poudre ……..... 18
I.5. Substrat ……..... 19
I.5.1. Préparation de substrat……..... 19
I.5.2. Construction du dépôt ……..... 20
I.5. 3. Ecrasement des particules sur le substrat ……. 21
I.6. L'impact ……..... 21
I. 6.1. Etalement de la particule ……..... 21
I.6.2. La solidification des lamelles ……..... 23
I.7. Phénomènes d'oxydation ……..... 23
I.7.1. Oxydation des substrats ……..... 24
I.7. 2.Epaisseur de la couche ……..... 25
I.7.3. Oxydation des gouttelettes en vol ……..... 26
I.8. Oxydation lors de la formation du dépôt …….. 27

- L'oxydation des lamelles
- L'oxydation entre deux passes successive

I.8.1. Caractéristiques du dépôt ……..... 27

- L'adhésion chimique
- L'adhésion physique

I.8.2. Microstructure ……..... 29
I.8.3. Teneur en oxydes et porosité ……..... 29
I.8.4. Adhérence et dureté ……..... 29
I.8.5. Resistance à la corrosion ……..... 30
I.9.Conclusion ……..... 31

Chapitre II : Modélisation mathématique

II.1. Introduction ……..... 32
II.2. Modèle dynamique ……..... 32
II.2. Modélisation de L'écoulement des Fluides …… 32
II.2.1. Equation de Navier-Stokes ……..... 32
II.2.2. Equation de continuité ……..... 32
II.2.3. La décomposition statique (La décomposition de Reynolds) ……. 32
II.2.4. Les équation des mouvements moyennes …….. 33
II.2.4.1. Équation de continuité de mouvement moyen ……... 33

II.2.4.2. Équation de Navier-stocks moyenne ……..... 33
II.2.4.3. Equation de transport des tensions de Reynolds ……. 34
II.2.4.4. Équation de l'énergie cinétique fluctuante [8]: $K=\frac{1}{2}R_{ij}$ ……. 35
II.2.4.5. Équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique fluctuante …… 35
II.2.5. Problème de fermeture des équations ……..... 35
II.2.6. Quelques hypothèses classiques de la fermeture de turbulence …… 36
II.2.6.1. Hypothèse de chou ……..... 36
II.2.6.2.Hypothèse de viscosité turbulente de bousines……. 36
.2.6.3.hypothèse de longueur de mélange de Prandtl …… 36
II.2.6.4. Hypothèse de Prandtl-Kolmogorov ……..... 37
II.2.7. Les modèles de turbulence et leurs classifications …… 37
II.2.7.1.Les modèles à viscosité turbulence algébrique (modèle à zéro équation de transports) ……..... 37
II.2.7.2. Les modèles à une équation de transport ……... 37
II.2.7.3. Modèle Algébrique aux tensions de Reynolds (ASM) …….. 38
II.3. Modélisation du transfert de chaleur ……..... 40
II.3.1. Equation d'énergie ……..... 40
II.3.2.Transferts de chaleur en écoulements incompressibles……. 40
II.4.Méthode de VOF ……..... 40
II.4.1.Idée fondatrice ……..... 40
II.4.2.Equation sur le taux de présence ……..... 41
II.4.3.Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle ……. 41
II.4.4.Equation de conservation de la quantité de mouvement …… 41
II.4.5.Tension inter faciale ……..... 42
II.4.6.Angle de contact ……..... 42
II.4.7.Prise en compte dans le modèle VOF ……..... 42
II-5 Modélisation biphasique liquide/solide ……..... 43
II.5.1 Lois de comportement et couplage cinématique…….. 44
II.5.2 Système biphasique unique ……..... 44
II.5.3 Formulation éléments finis et méthode de résolution …… 45
II.5.4 Extension du modèle au changement de phase…….. 46
II.6.Conclusion ……..... 46

Chapitre III : Modélisation numérique

III.1. Introduction ……..... 47
III.2.Les méthodes numérique ……..... 47
III.2.1.méthode des différences finies ……..... 47
- Avantage
- Inconvénients

III.2.2.méthode des éléments finis ……..... 47
- Avantage
- Inconvénients

III.2.3.méthode des volumes finis ……..... 48
III.3. Présentation de la méthode des éléments finis …… 48
III.3.3.forme générale des équations du système…… 49
III. 3.3.1. Terme temporelle……..... 49
III.3.3.2. Terme d'advection……..... 51
III.3.3.2.1. monotone streamline upwind approach (MSU) ……. 51
III.3.3.2.2. La méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin) …… 52
III.3.3.2.3.approche colloquée de galerkin(COLG) …….. 52
III.3.3.3.terme de diffusion ……..... 53
III.3.3.5. termes source ……... …….. 53
III.4. Méthodes de discrétisations ……..……. 54
III.4.1.choix d'un maillage ……..... 54
III.4.2. Méthodes de calcul d'interface ……..... 55
III.4.3. Evolution de la Surface Libre ……..... 55
- Méthode Lagrangienne (maillage mobile).
- Méthode Eulérienne (maillage fixe).

III.4.3.1 Méthodes de suivi de front ……..... 57
III.4.3.2 Les méthodes de suivi de volume ……..... 57
III.5. La Méthode VOF CIAM ……..... 58
III.5.1Méthodes de ligne de niveau ("level set")……..... 59
III.6.Conclusion……...…… 59

SOMMAIRE

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction ……..... 60

IV.2. Logiciel d'analyse d'ANSYS ……..... 60

IV.3. Matériaux utilisé ……..... 61

IV.3.1. L'aluminium ……..... 61

IV.3.2.le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation …… 62

IV.4 Identification ……..... 63

IV.4.1. Impact d'une particule d'aluminium……..…… 63

IV.5. Oxydation de la surface des substrats métalliques …….. 65

- Résistance thermique de contact additionnelle.

IV.5.1. configuration et conditions d'étalement avec une couche d'oxydation ……. 66

IV.6. Description du domaine d'application……..... 66

- Cas 1 : e= 0.1mm diamètre les pics d=0.1mm ……. 67
- Cas2 : e= 0.3 mm diamètre des pics d= 0.4 mm…… 70
- Cas3 : e= 0.5 mm diamètre de les pics d= 0.4mm……. 72
- Cas 4 : e= 1mm diamètre de les pics d= 0.4 mm……. 75
- Cas 5 : e= 1.5 mm diamètre des pics d= 0.4 mm……. 78

IV.7. Comparaison des résultats …….. 80

IV.7.1. Comparaison des facteurs d'étalements pour chaque cas ……. 80

IV.7.2. Comparaison des températures a l'interface pour chaque cas ……. 81

IV.7.3. Comparaison des pressions a l'interface pour chaque cas …… 82

IV.8. Conclusion …… 83

Conclusion générale ……. 84

References bibliographiques…… 86

Introduction générale

Introduction générale

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 projection plasma est une technique de traitement de surface appartenant au groupe de la projection thermique. Ces procédés sont caractérisés par le fait qu'ils produisent des revêtements de surface par dépôt de fines particules, métalliques ou non dans un état fondu ou à une température proche de leur point de fusion [1]. Les secteurs d'application de ces techniques sont très vastes : mécanique (rouleaux de laminoirs, guides fils, pompes, pistons…), aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique…), biomédical (prothèses, couches biocompatibles…), industrie nucléaire (protection contre la corrosion et l'usure, réacteurs chimiques…), l'industrie automobile, l'électroménager. La morphologie finale de l'impact dépend du diamètre de gouttelette, de la température, de la vitesse, et du l'état fondu [2.3]. Les besoins croissants de revêtement de plus en plus compétitifs et sophistiqués ont cependant rendu nécessaire un effort constant de recherche et développement dans le domaine de la compréhension des phénomènes mis en jeu lors de la génération des dépôts. Ces démarches sont essentiellement basées d'une part, sur l'étude des jets de plasma et des particules en vol dans le jet, et d'autre part sur l'étude des propriétés microscopiques et macroscopiques des revêtements.

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact dynamique couple avec la solidification (thermique) des gouttelettes d'un alliage d'aluminium de 3,92 mm de diamètre impact avec une vitesse initiale de 3m/s sur un substrat en présence de couche d'oxyde.

Le 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 du problème étudié.

Le troisième chapitre est dédié à la résolution numérique et les méthodes de calcul.

Dans le dernier chapitre, de ce mémoire on va présenter les résultats de simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact et la solidification des gouttes sur un substrat avec de pics en présence de couche d'oxyde obtenus par le code de calcule ANSYS.

Le but principal de ce travail est l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact de la goutte sur le substrat avec l'analyse de l'effet de l'impact de particule d'aluminium qui s'écrasent sur le substrat d'acier, ainsi que l'étude de l'influence de l'épaisseur de couche d'oxyde sur la formation des lamelles.

Notre travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre I: Etudes Bibliographiques

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

I.1.La projection thermique :

I.1.1. historique: [4]

Généralement, n'importe quel matériel qui ne se décompose pas, ne se vaporise pas, ne sublime pas, ou ne dissocie pas pendant le chauffage, peut être thermiquement pulvérisé. En conséquence une grande classe des matériaux métalliques et non métalliques (métaux, alliages, céramique, cermets, et polymères) peut être déposée par la pulvérisation thermique . Un enduit thermiquement pulvérisé est un dépôt produit par un processus dans lequel des particules fondues ou semi fondues en utilisant une source de chaleur, sont appliquées par impact sur un substrat.

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 quand le Dr. M.U. Schoop de Zurich, Suisse, a eu l'idée de projeter de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme d'un chalumeau oxyacétylénique. Par la suite, il a également inventé le premier matériel de pulvérisation. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôts de bronze). Dès 1914, des essais de projection par arc électrique furent réalisés.

C'est après la seconde guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de rénovation depièces usagées), puis à l'industrie aéronautique.

La recherche de propriétés de surface spécifiquessur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, elle a permis le développement de nouveaux procédés (plasma, canon à détonation, HVOF High Velocity Oxygene Fuel...) et de nouveaux matériaux associés (céramiques, carbures, composites, superalliages...).

La projection thermique est un groupe de processus où un matériau de base est chauffé et propulsé sous forme de particules ou gouttelettes sur une surface. Le pistolet de pulvérisation thermique produit de la chaleur nécessaire en employant des gaz combustibles ou

un arc électrique. Durant leur échauffement les matériaux sont chauffés à l'état plastique ou fondu et sont confinés et accélérés par un jet comprimé de gaz vers le substrat. Les particules heurtent le substrat, s'aplatissent, et forment des lamelles minces (splats)qui se conforment et adhèrent aux irrégularités du substrat préparé et/ou interagissent ente elles.

La grande flexibilité de la projection thermique est la variété extrêmement grande de matériaux qui peuvent être employés pour produire des revêtements. Pratiquement, n'importe quel matériel qui fond sans se décomposer peut être employé. Un deuxième avantage principal est la capacité de la plupart des procédés de la projection thermiques d'appliquer des revêtements aux substrats sans entrée significative de la chaleur. Ainsi, des matériaux avec les points de fusion très élevée, tels que le tungstène, peuvent être appliqués aux pièces finement usinées et entièrement soumises à un traitement thermique sans changer les propriétés de la pièce et sans déformation thermique excessive de la pièce. Un troisième avantage est la capacité, dans la plupart des cas, d'enlever et faire revêtir les portés endommagés sans changement des dimensions de la partie.

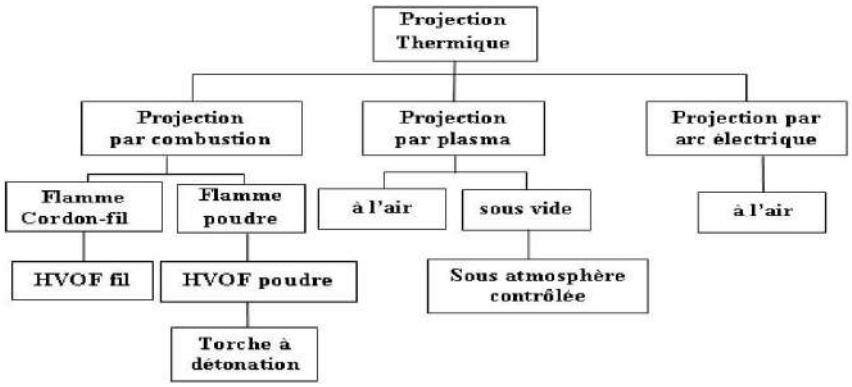


Figure I-1 : schéma de principe de la projection thermique [5].

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 [6]. La figure

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

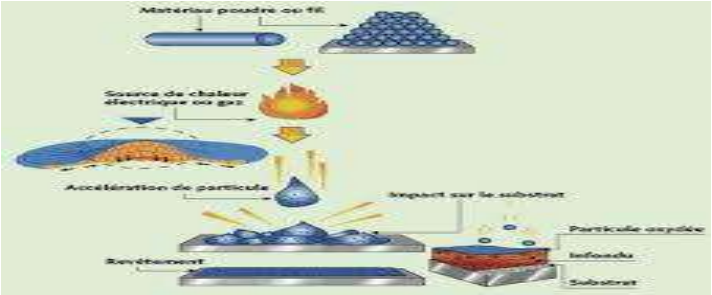


Figure I-2 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [7].

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

I.2.1 .Projection par la flamme :

Cette technologie utilise l'énergie de la combustion d'un carburant gazeux (acétylène par exemple) avec de l'oxygène. Les températures atteintes par une flamme oxyacétylénique sont de l'ordre de 3300 K ; les matériaux dont la température de fusion est inférieure à 2573 K peuvent être projetés sous forme de poudres. Les matériaux utilisés sous forme de fil ou de tige (en général des métaux, des alliages et certaines céramiques) peuvent être projetés si leur température de fusion est inférieure à 3173 K.

On distingue en général 3 techniques qui relèvent de cette technologie : projection par flamme, projection par flamme hypersonique et projection par canon à détonation. De plus, pour la projection par flamme, on différentie la projection dite « flamme poudre » de celle dite « flamme fil» d'après le conditionnement du matériau.

I.2.1.1 La projection flamme –poudre :

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir.

Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure suivante. L'utilisation de débit litres pour contrôler les débits de gaz est un facteur important. Un des principaux avantages des pistolets de projection flamme poudre par rapport au pistolet de projection flamme fil est lié à la plus grande variété

de revêtements disponibles due au fait que la plupart des matériaux sont disponibles sous forme de poudres. Le procédé de projection flamme poudre est seulement limité par les matériaux qui ont une température de fusion supérieure à celle de la flamme ou alors dans le cas où le matériau projeté se décompose à la chaleur. Des revêtements de polymères (PTFE, PA12, ...) peuvent aussi être réalisés par projection flamme [7].

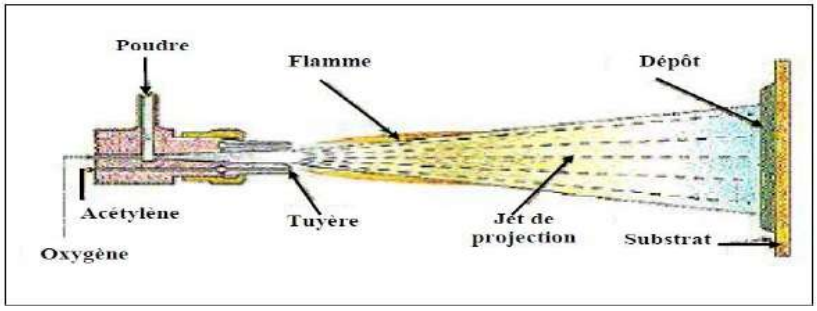


Figure I-3 *:* Schéma de principe d'un pistolet flamme [8]

I.2.1.2.La projection flamme-fil :

Dans cette technique (fig. I-4) le matériau est conditionné sous forme de fil ou de tige et entraîné dans la flamme par des rouleaux placés à l'arrière de la torche. Ces rouleaux sont actionnés par un moteur électrique ou un moteur pneumatique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés. [8-9] La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme (T fusion= 0,95 T flamme). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous

forme de fils et quelques céramiques (Al2O3, Al2O3-TiO2, ZrO2avec stabilisants).

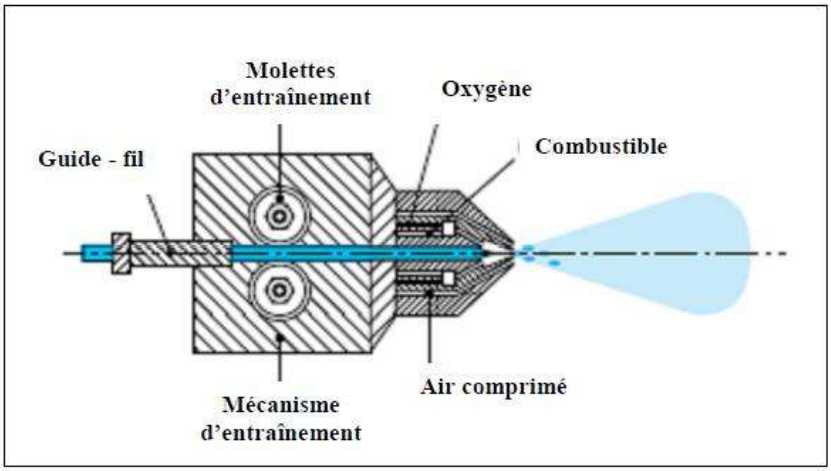


Figure I-4: Schéma d'un pistolet flamme fil [9].

I.2.1.3. La projection flamme de cordons flexibles:

Ce procède permet de projeter des petites particules agglomérées et incluses dans un cordon souple avance doucement au cœur de la flamme, ce qui leur permet d'atteindre une température (TP) proche de celle-là de la flamme (TP ≈0,95 T flamme), et de projeter des particules céramiques. De plus, l'utilisation des cordons évité les problèmes de colmatage des systèmes de distribution des particules. Les pistolets de projection, flamme cordon, comportent deux parties, une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérise et une partie entrainement du cordon...

La partie chalumeau comprend un mélangeur de gaz, ou l'oxygène et le combustible sont combines avant de passer dans les injecteurs de la buse. Normalement, le mélangeur de gaz est court (généralement inferieur a 50 mm) et les injecteurs ont une géométrie conique, avec un diamètre de sortie de gaz inferieur a 1mm afin de réduire le risque de retour de la flamme ou "flash back", qui se produit lorsque la vitesse d'alimentation des gaz combustibles devient inferieure a celle de propagation de la flamme. La partie entrainement du cordon est animée soit par des turbines a air, soit par des moteurs électriques. Le système d'entrainement par moteur électrique permet une avance régulière du cordon, grâce a un couple moteur constant, et ceci quelles que soient les variations de traction du fil en amont du pistolet. L'avantage du système d'avance par turbine est son poids et son cout plus faibles.

La vitesse des particules projetées est inferieure a 150 m.s-1 et la distance entre la buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques centaines de µm a quelques millimètres. En général, les dépôts obtenus au moyen de ce

procède présentent une bonne adhérence (20 – 40 MPa mesurée par essais de traction) et de structures homogènes.

I.2.1.4.La projection supersonique par combustion :

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 m $.s^{-1}$) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée (0.5 à 1 MPa) [10]. La chambre de combustion est refroidie et les gaz s'évacuent par une tuyère convergente – 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 de l'oxygène et un combustible gazeux. Par combustion, les gaz sont transformés en énergie cinétique. De la poudre est alors introduite dans la torche et au moyen d'une buse convergente/divergente cette poudre fondue ou semi fondu est accélérée à une vitesse supersonique.

  Les particules ainsi projetées sur le substrat sont aplaties et forment lors de leur refroidissement et solidification le revêtement. La vitesse élevée des particules, leur réchauffement uniforme et un temps de passage court dans la flamme contribue à la formation d'un revêtement ayant une densité élevée et une excellente adhérence [11].

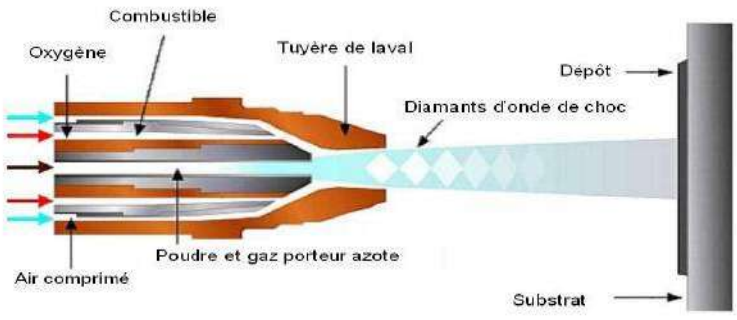


Figure. I-5 : schéma du procédé HVOF**.**

- **Le procédé HVAF :** High Vélocité air –fuel flamme, la combustion est assurée par un mélange kérosène –air comprimé [10].

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.2.1.5.Le canon à détonation :

Le processus de canon de détonation, a été inventé il y a une quarantaine d'années. Un mélange acétylène-oxygène détonant dans un tube de 1m de long (fig.1-6), des poudres très fines de matière de base sont introduits dans ce tube, une étincelle met à feu le mélange et produit une explosion qui fait chauffée et éjectée la poudre à très grande vitesse (950m/s) et à des températures de l'ordre de 4000°C par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa [12,13].Le régime de projection est discontinu. Les particules impactent dans un état plastique donc avec une oxydation très faible (moins de 0,1 % en poids). La densification du dépôt est excellente compte tenu de la vitesse d'impact. Il en résulte des revêtements exceptionnellement homogènes et adhérents, sans toutefois que la température du substrat soit extrêmement élevée. Contrairement à d'autres procédés qui provoquent l'apparition de contraintes résiduelles de traction dans les dépôts, ici l'on note l'apparition par « auto grenaillage » de contraintes résiduelles de compression favorables à la résistance à l'usure et aux pressions de contact élevées [13]. On projette ainsi divers mélanges de carbures de chrome, de tungstène, de titane, ou des alliages cobalt-molybdène-chrome intéressants pour lutter contre l'usure [12].

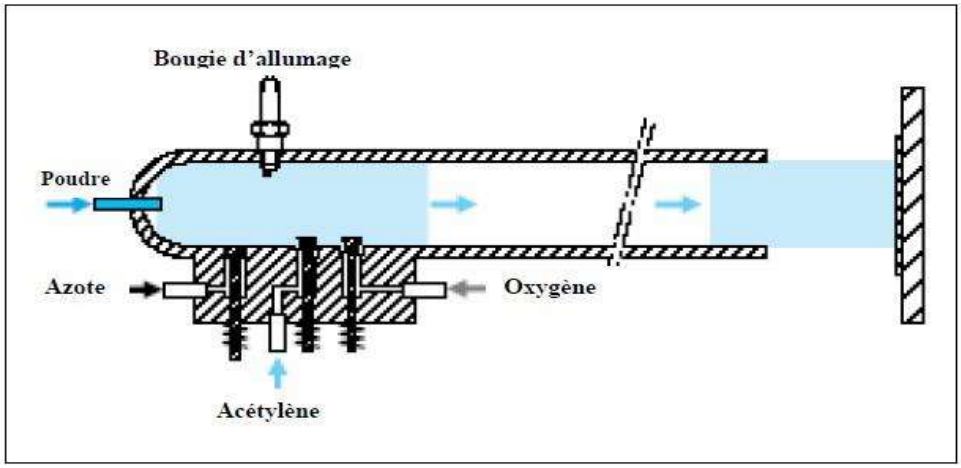


Figure I-6 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation. [14]

I.2.2. La projection par arc électrique :

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

I.2.2.1. La projection arc-fil [14]:

Cette technique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux électrodes sous formes de fils ductiles consommables comme source de chaleur pour fondre le matériau (fig. I-7). Celui-ci, réduit à l'état de gouttelettes, est pulvérisé sur le substrat par un jet d'air comprimé. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A Ce procédé de projection est simple et économique mais limité aux matériaux conducteurs et très filables ; le récent développement des fils fourrés céramiques tend à y remédier.

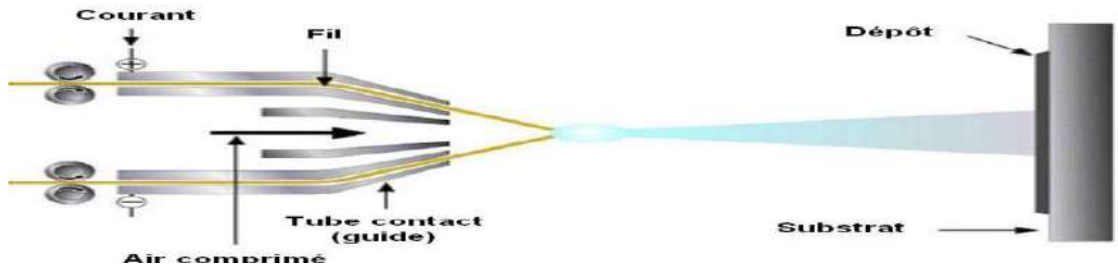


Figure I-7 : schéma du procédé arc fil

I.2.2.2. La projection par plasma d'arc soufflé :

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

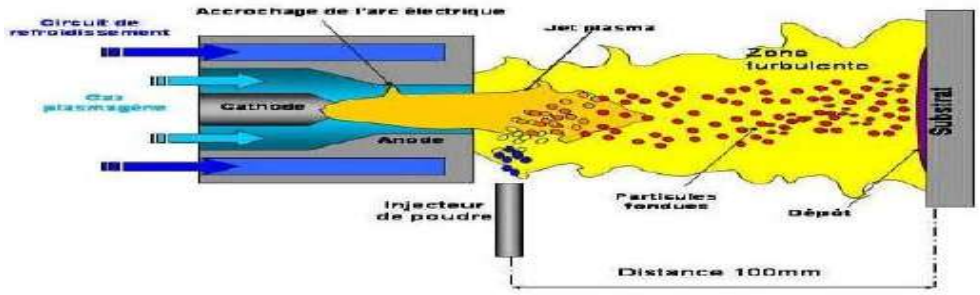


Figure I-8 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.

I.2.3 La projection plasma :

Ce procédé utilise des matériaux métalliques, céramiques ou cermets sous forme de poudre avec des particules de taille inférieure à 100 μm. Ces particules sont déposées dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. La source de chaleur est un jet de plasma produit par arc électrique ou une décharge radiofréquence [15].

I.2.3.1. Principe :

C'est cette technique qui a été utilisée pour déposer nos échantillons, elle utilise comme source thermique un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères) éclatant entre deux électrodes, dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général (fig. I-9). Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée de 1000 à 1500 m /s [16]. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur, généralement de l'argon. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat.

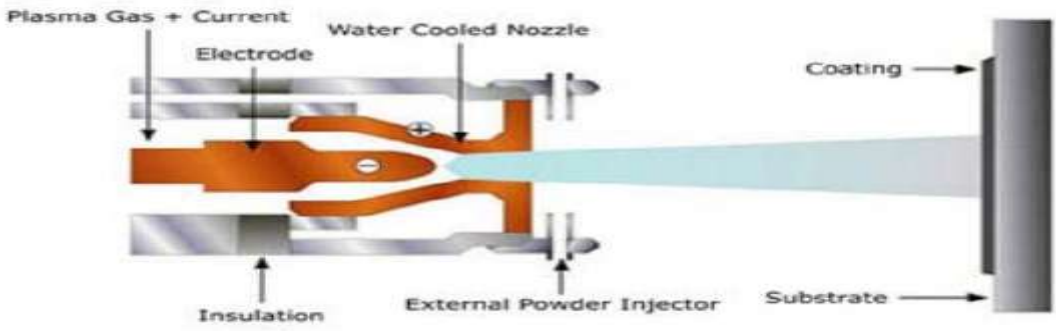


Figure I-9 : Principe de fonctionnement de projection plasma.

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 [1].

- **Torche à arc transféré :** l'arc jaillit entre une électrode interne et un corps conducteur, généralement le substrat

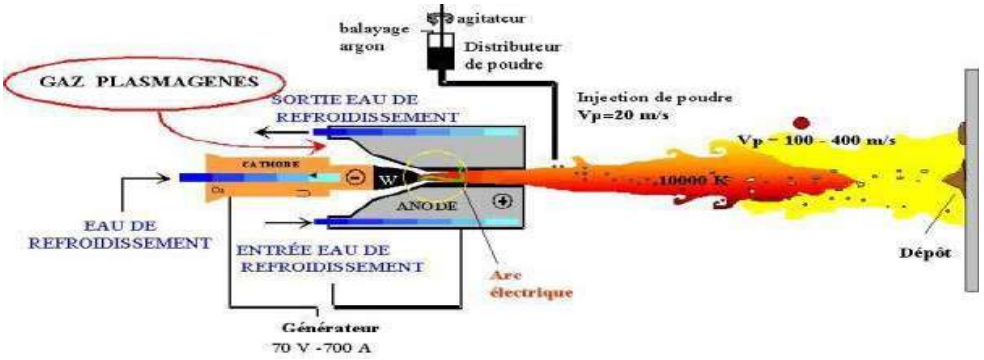


Figure I-10: Torche plasma à arc transféré

- **Torche à arc soufflé :** Dans la plupart des cas, la torche à plasma constituée d'une tuyère anode et d'une pointe cathode, fonctionne dans l'air à la pression atmosphérique. Ce procédé est appelé APS (Atmosphérique Plasma spraying). La différence de potentiel aux bornes de la cathode et de l'anode provoque l'éclatement d'un arc entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode. Cet arc est ensuite entretenu par le courant de forte intensité. La partie du gaz chauffée par effet Joule forme un volume de gaz ionisée ou plasma appelé colonne d'arc. Cette colonne d'arc quitte la torche en formant un dard (15) ou cœur du jet [17].

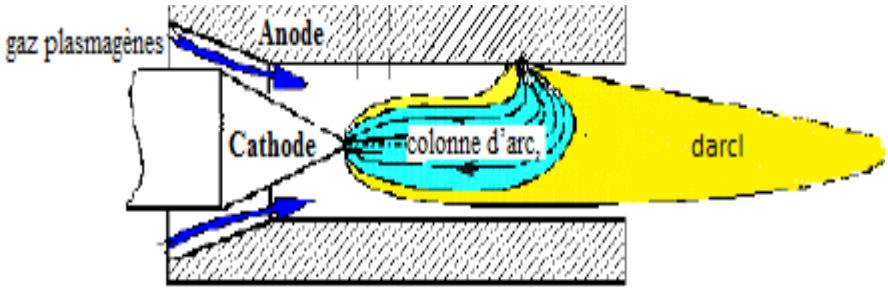


Figure I-11 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma.

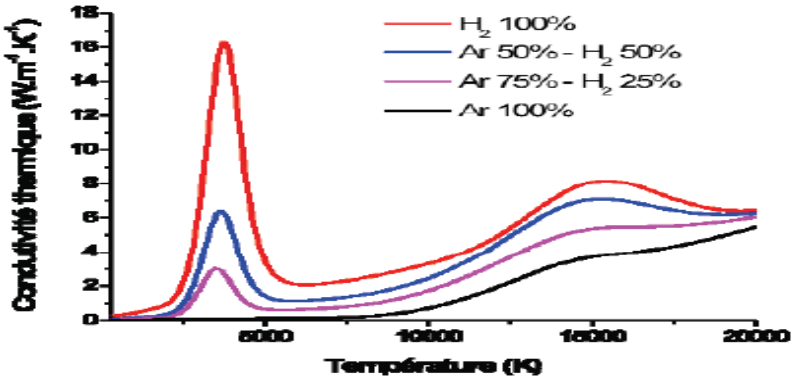


Figure I-12 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [1,18]

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 [16]. Cette surtension (6 à 10 kV) est appliquée à l'aide d'un circuit haute fréquence (plusieurs MHz) en série ou en parallèle avec l'arc et le générateur de courant. L'argon est souvent utilisé à l'amorçage car il érode peu les électrodes et qu'il s'ionise à plus faible énergie que les autres gaz plasmagènes (N2, H2, He).

I.2.3.2.2.Le gaz plasmagène :

Le gaz plasmagène est généralement constitué de deux gaz, le premier est un gaz lourd qui donne sa quantité de mouvement aux particules injectées. Le choix est alors limité à l'argon (40 g/mole) ou à l'azote moléculaire (28 g/mole). Les torches utilisées (développée au laboratoire ou industrielle comme la PTF4 de Sulzer Metco) étant conçues pour travailler à l'argon comme gaz primaire nous ne considérerons que ce gaz. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent la tension « utile » qui va être disponible dans le jet de plasma est $\int_0^1 E(Z).dz$ Où lest la longueur de la colonne d'arc. Le champ électrique dépend fortement des pertes de la colonne d'arc. Plus celles-ci augmentent plus l'arc se constricte pour les limiter, accroissant par ce biais le champ électrique E. Les pertes latérales dépendent principalement d'une part du diamètre interne de la tuyère (plus il diminue plus elles augmentent, pour un courant donné) et d'autre part de la conductivité thermique du gaz plasmagène. Cette dernière est de loin la plus faible de toutes avec 'argon [19].

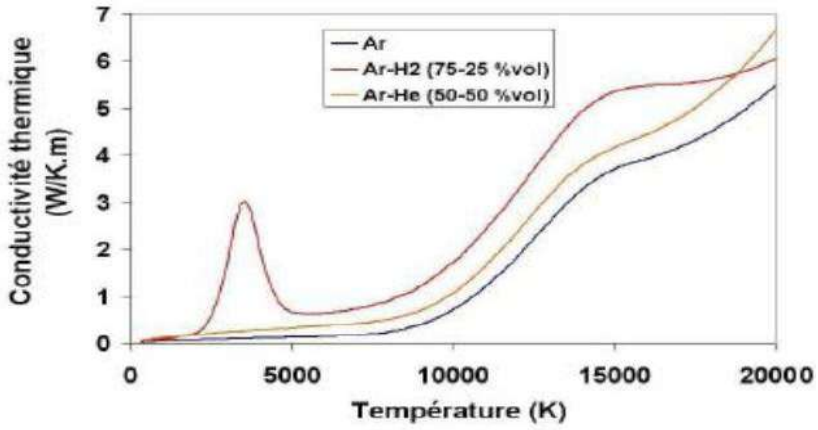


Figure I-13 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes [19].

Pour ce dernier, cela implique des champs dans la colonne d'arc de quelques centaines de V/m limitant ainsi la tension utile à 10-15 V pour une tuyère de 6 ou 7 mm de diamètre interne. C'est pourquoi on utilise des mélanges Ar-H2 ou Ar-He, chacun ayant des avantages et des inconvénients. La tension moyenne dans l'arc est alors, suivant les conditions de fonctionnement, d'une trentaine de volts pour Ar pur, une quarantaine de volts pour Ar-He et une bonne soixantaine pour Ar-H2. Cependant dans ce dernier cas, le courant est limité à environ 600-650 A car la constriction au niveau pied cathodique par l'hydrogène entraîne l'usure plus rapide de la cathode au-delà de ce courant. Par contre avec l'Ar ou l'Ar-He on peut atteindre 900 A voire 1000 A. De plus l'He accroît la viscosité du mélange au-delà de 10000 K (cf. Figure I-13) ce qui permet, pour des vitesses d'écoulement proches, d'obtenir des jets de plasma un peu plus larges et un peu plus longs avec ce mélange.

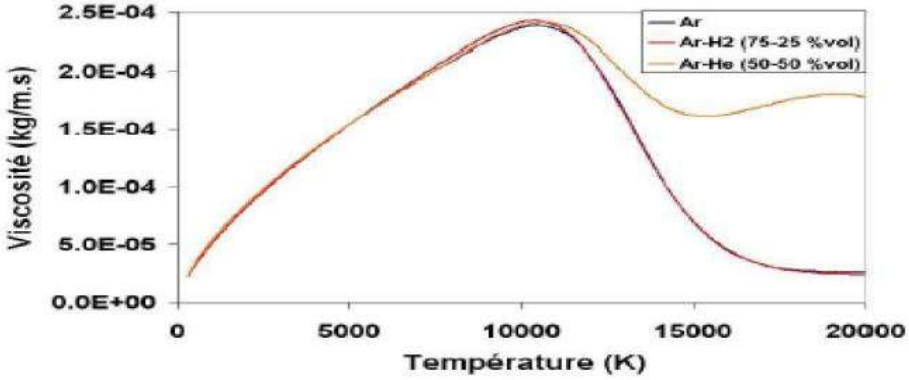


Figure I-14 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [19].

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

Comme nous pouvons le voir sur la Figure I–14 elle est d'autant plus élevée pour une température donnée que l'on passe de l'argon pur, à l'Ar-He puis à l'Ar-H2. Mais ces courbes montrent également un point important : au-delà de 10000 K, l'augmentation du degré d'ionisation avec la température entraîne une variation importante d'enthalpie et pour accroître la température de 2000 K il faut pratiquement doubler l'enthalpie.

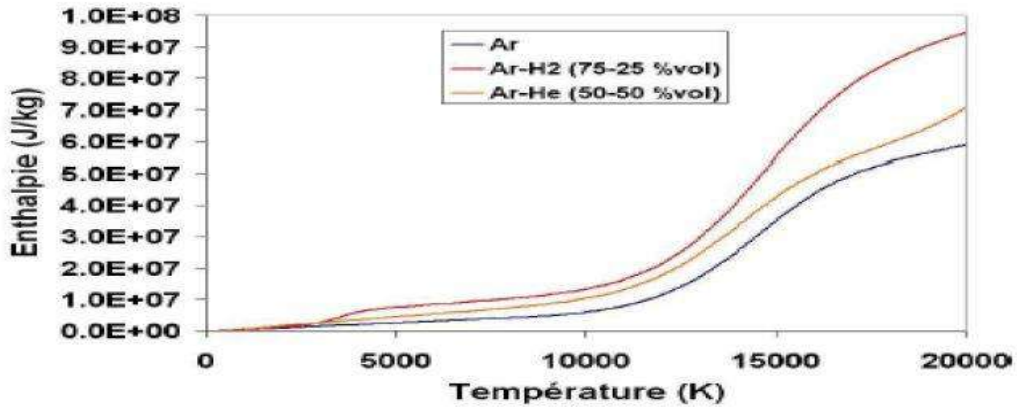


Figure I-15: Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [19].

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-16) :

- **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 » [12,20] 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).

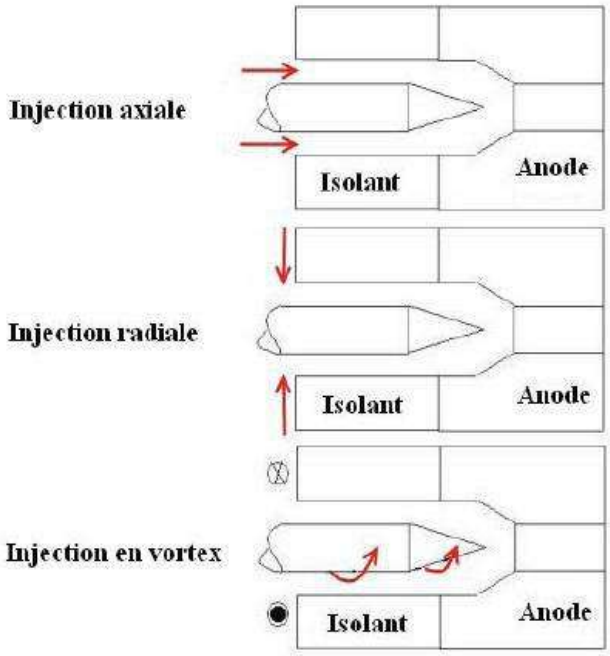


Figure I-16: Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche De projection plasma [1].

I.2.3.3. Formation du jet plasma :

Le plasma est généré par la création d'une décharge électrique en courant continu entre l'extrémité d'une cathode en tungstène théorie (2% massique en thorine pour abaisser le potentiel d'extraction électronique de l'électrode) et la surface d'une anode concentrique en cuivre. L'amorçage de l'arc électrique se fait en rendant conducteur le gaz circulant entre les deux électrodes ce qui requiert l'utilisation d'un gaz facilement inusable (de l'argon) et l'application d'impulsions électriques à haute fréquence (quelques MHz) et haute tension (entre 6 et 10 kV). Le jet de plasma est caractérisé par :

- une température à cœur élevée : de 5000 à 14000 K avec une densité de flux thermique
- Pouvant atteindre 1010 W.m-2.
- une vitesse d'écoulement élevée : de 500 à 2500 m/s
- des gradients radiaux importants : jusqu'à 5.105 (ms.-1).m-1 pour la vitesse et 107 K/m Pour la température.

- un mélange gazeux de faible densité : 1/30 à 1/40 de la densité du mélange gazeux froid [21].

I.2.3.4. Ecoulement du jet plasma :

La Figure I-17 schématise l'écoulement du jet plasma dans l'atmosphère. Le jet formé dans la chambre d'arc (zone 1) sort avec une grande vitesse (500 à 2500 m/s) et entre en contact avec le gaz environnant froid et au repos (zone 2). La différence de vitesse entre le jet et les gaz froids environnants engendre, à la frontière du jet, la formation de tourbillons d'instabilités, appelés "tourbillons de Kelvin-Helmotz". Ces tourbillons grossissent en se déplaçant vers l'aval et l'écoulement devient turbulent. Ils engouffrent le gaz ambiant sous forme de bulles qui gardent, dans un premier temps, une masse volumique et une inertie supérieures (plus d'un ordre de grandeur) à celles du gaz plasmagène. Ces bulles, progressivement chauffées par le plasma, se cassent dans le jet en structures de plus en plus petites et augmentent le caractère turbulent au sein de l'écoulement (zone 3). Lorsque ces turbulences atteignent l'axe du jet, celui-ci perd son caractère laminaire. Il devient alors pleinement turbulent et l'entraînement croissant du gaz ambiant contribue à réduire sa vitesse et son enthalpie (zone 4).

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

- Entre 10-3s et 10-4s, le jet est fluctuant, du fait des instabilités du pied d'arc. L'effet non Négligeable de ces fluctuations sur le traitement thermocinétique des particules a été étudié par
- Entre 10-1s et quelques secondes, le jet de plasma est globalement stable. C'est en général ce que L'on considère pour déterminer les transferts plasma-particules contrôlant la projection [22].

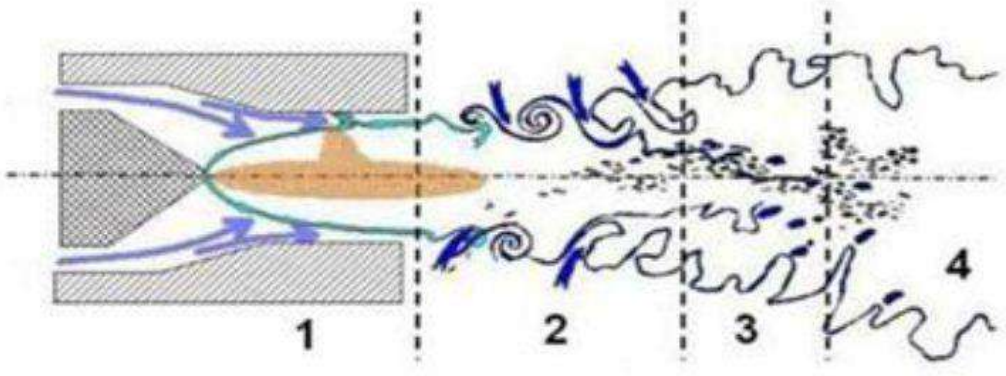


Figure I-17 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé**.**

I.4. Traitement des particules dans le jet plasma :

Le traitement des particules dans le jet plasma met en jeu l'ensemble des transferts de quantité de mouvement, de masse et de chaleur entre le plasma et les particules. Ces transferts sont fonction des paramètres du plasma (champs de température et de vitesse de l'écoulement, mélange plasmagène, …) et des paramètres des particules ou particules (propriétés thermiques, distribution de taille, morphologie, …) [14].

I.4.1 Injection de la poudre :

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

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

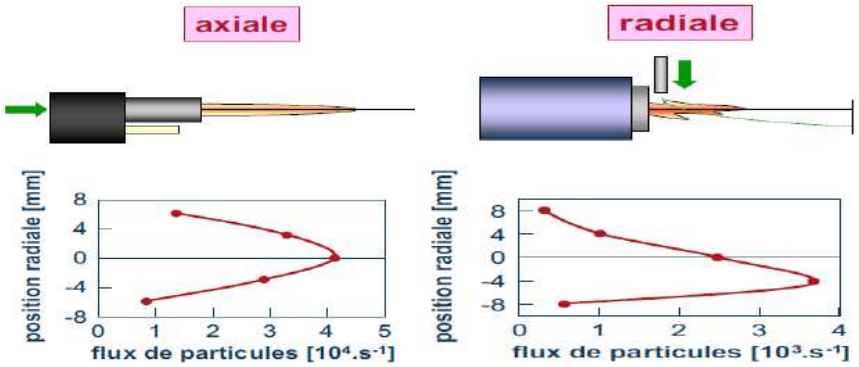


Figure I–18 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale).

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 [23, 24].

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 [25, 26] :

- 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. Après 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. Autre 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 :[27]

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire comportant éventuellement des oxydes, des microporosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites (figure I-19). 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. 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.

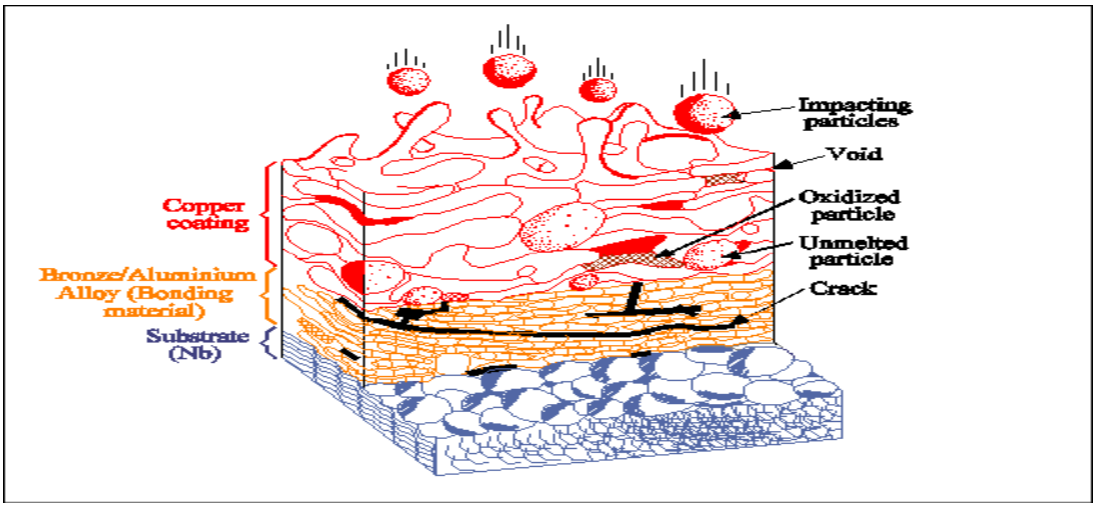


Figure I-19 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique **[28].**

I.5. 3. Ecrasement des particules sur le substrat :

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

I.6. L'impact :

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

I.6.1. 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-20). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement **[29, 30].**

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 **[31].** 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.

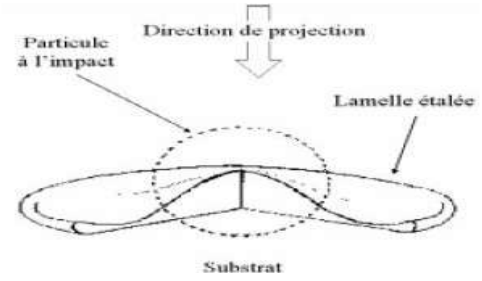


Figure I-20 : Schéma d'écrasement de la particule **[32]**.

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.…) **[32].**

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 **[33]**. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température, de la rugosité et des propriétés thermiques du substrat sur l'étalement et la solidification des particules **[34]**. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué **[35]**. 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) **[36]** 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) **[37].**

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

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.6.2. La solidification des lamelles :

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

I.7. Phénomènes d'oxydation :

L'étude de la teneur d'oxyde est importante dans les dépôts métalliques réalisés par projection thermique puisqu'ils contrôlent habituellement les propriétés de fonctionnement des matériaux. En général, il y a des traces d'oxydes au sein du dépôt et à l'interface dépôt/substrat. L'inclusion d'oxydes (qui sont fragiles) 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. La force d'adhérence avec le substrat et la ductilité (fissures dans la couche) est réduite en présence d'oxydes. D'autre part, l'oxydation des couches n'est pas toujours nuisible. Par exemple quand l'oxydation des couches WC-Co17 déposées par HVOF est bien douce, la dureté du dépôt augmente 60 à 75 % (de 850 à 1500 Hv), comparé au matériau WC-Co17 aggloméré. Les contraintes résiduelles sont un problème difficile à cerner dans les couches oxydées, parce que la force de rupture et la ductilité des couches sont diminuées [38]. Le contenu d'oxyde dans le dépôt dépend de la technique de pulvérisation, des paramètres de pulvérisation et des compositions en produit de départ, ESPIE et ses collaborateurs ont rapporté que le contenu d'oxygène dans les particules en acier à faible teneur en carbone, pulvérisé par plasma, a augmenté avec la distance de jet. Fukushima et Kuroda ont présenté l'effet semblable pour le revêtement de Ni–20Cr pulvérisé par plasma, mais ils ont également signalé que le contenu d'oxygène dans le revêtement en acier inoxydable pulvérisé par HVOF a été diminué. Suivant les indications du graphique (voir figure I-21), la projection d'arc fil et l'APS ont produit des couches d'oxydation et de porosité significatives tandis que le HVOF manifestait une valeur rigoureusement plus basse [39].

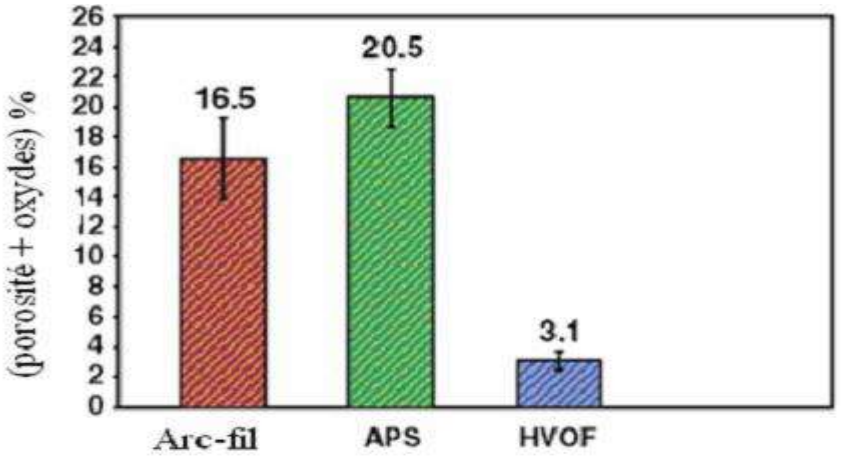


Figure I-21 : Effet des techniques de projection sur le contenu des oxydes et porosité.

La présence de ces oxydes dans le dépôt provient de différentes sources. A l'interface dépôt/substrat, la source c'est l'oxydation de la surface du substrat (en métal) et au sein du dépôt. Il y a deux mécanismes d'oxydation qui ont contribués à l'inclusion d'oxyde dans l'e dépôt Un mécanisme est l'oxydation en vol. L'autre mécanisme est le processus supplémentaire d'oxydation après que les particules projetées impactent le substrat suivi de phénomène l'aplatissement et du refroidissement rapide [40].

I.7.1. Oxydation des substrats :

Dans 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. Les études montrent que le préchauffage des substrats améliore l'étalement des particules et il peut influencer sur les propriétés des dépôts, essentiellement l'adhésion sur les substrats [41].

Le préchauffage des substrats métalliques sous atmosphère ambiante peut provoquer l'oxydation de leur surface. La présence d'oxydes peut modifier les propriétés thermiques, la structure cristalline et la rugosité de sa surface. Les caractéristiques de la couche d'oxyde sont liées à la nature du substrat, à son environnement, ainsi qu'à la vitesse, à la température et au temps de préchauffage [42].

Pour des substrats lisses (Ra < 0,05 μm) l'oxydation directe dans l'air à 900°C d'un acier XC38 conduit à la formation de l'oxyde Fe2O3. Dans ce cas, l'adhésion des lamelles, et donc du dépôt, est affaiblit par le délaminage de la couche d'oxyde (figure I-22).

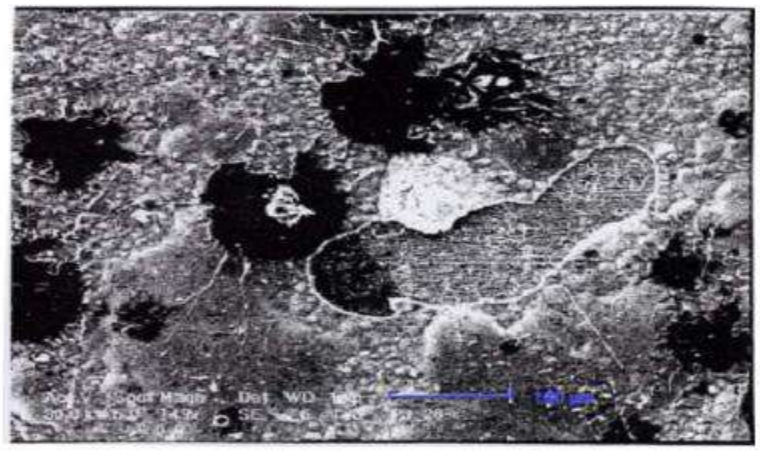


Figure I-22 : Lamelles d'alumine sur une couche d'oxyde Fe2O3 obtenue par peroxydation d'un substrat XC38 au four sous air avec rupture et délaminage de la couche d'oxyde[4].

Sous pression réduite, à 900°C, se forme l'oxyde Fe3O4adhérent avec de l'alumine projetée (28 ± 7 MPa), mais à 900°C et sous pression atmosphérique il se forme de l'oxyde Fe1-xO qui conduit à des bon résultats (adhésion de l'alumine projetée de 44 ± 6 MPa). On peut expliquer ceci par la rugosité accrue du substrat en raison de la formation superficielle de gros cristaux de Fe1-xO (figure I-23). Par ailleurs assez adhérents au substrat (croissance épit axiale), et peut-être aussi par une légère réaction inter faciales entre l'alumine et Fe1xO [43].

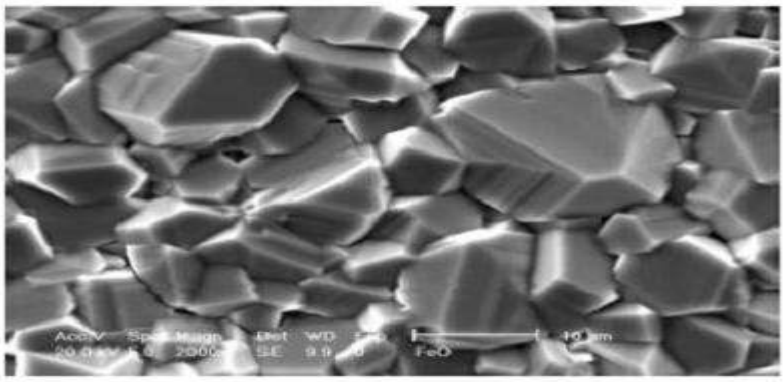


Figure I-23: Couche de FeO obtenue sous atmosphère de CO2 à 1000 °C pendant 45 min [4].

I.7. 2.Epaisseur de la couche :

L'épaisseur de la couche d'oxyde formée à la surface des substrats préchauffés sous différentes conditions a été analysée par la spectroscopie UV-visible et les résultats sont présentés à la Figure I–24. A 573 K, le substrat 1040 présente une couche d'oxyde plus importante que le substrat 9310. En augmentant la température de préchauffage de 573 K à

723 K pour les substrats 1040 et 9310, l'épaisseur de l'oxyde augmente respectivement de 12.5% et 74.2%. En revanche, le taux d'oxydation peut être limité en préchauffant les substrats dans l'enceinte d'azote.

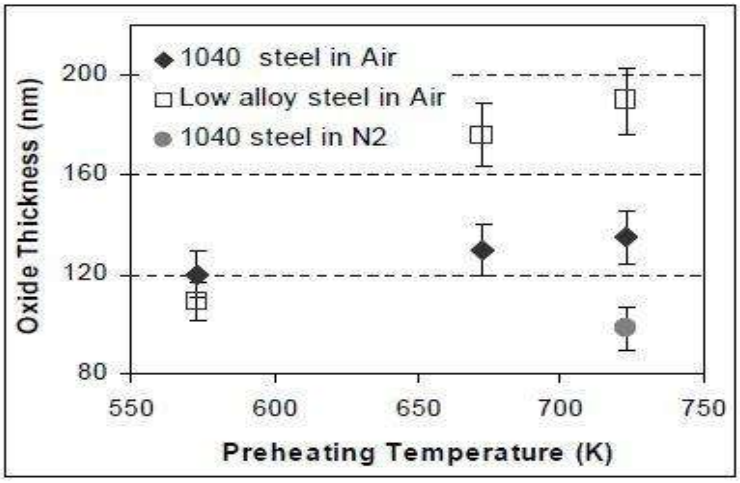


Figure I–24 : Epaisseur de la couche d'oxyde à la surface des substrats préchauffés dans différentes conditions.

I.7.3. Oxydation des gouttelettes en vol :

L'importance de l'oxydation des gouttelettes en vol dépend **[44, 45]** :

- 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 cœur 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-25).

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 **[46, 47,48]**

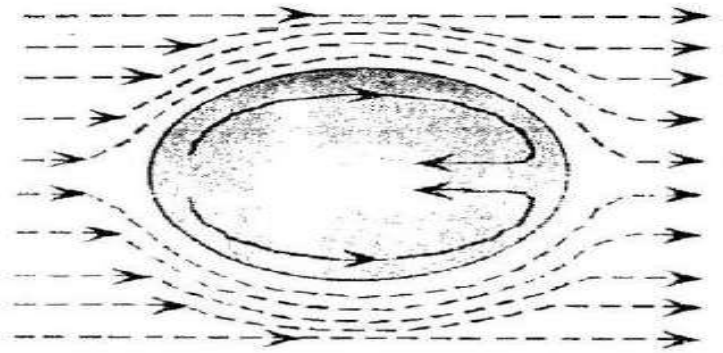


Figure I-25: Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette **[45].**

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

I.8. Oxydation lors de la formation du dépôt :

Il est possible de distinguer 2 types d'oxydation **[47]** :

L'oxydation des lamelles : elle est généralement peut 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.

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.8.1. 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 à la compréhension.les schémas (figure I-26b) montrent les différentes phases 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 [49] :

- 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 I-26a).

- **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 diffusion .que a lieu lorsque le substrat est maintenu a température élevée, comme lors de la projection sou vide.

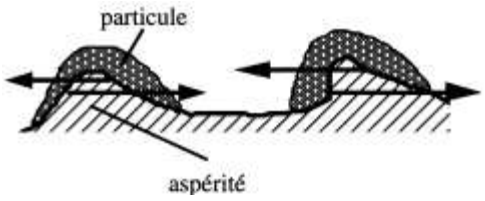


Figure I-26a : écrasement de particules sur des aspérités.

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 [51]

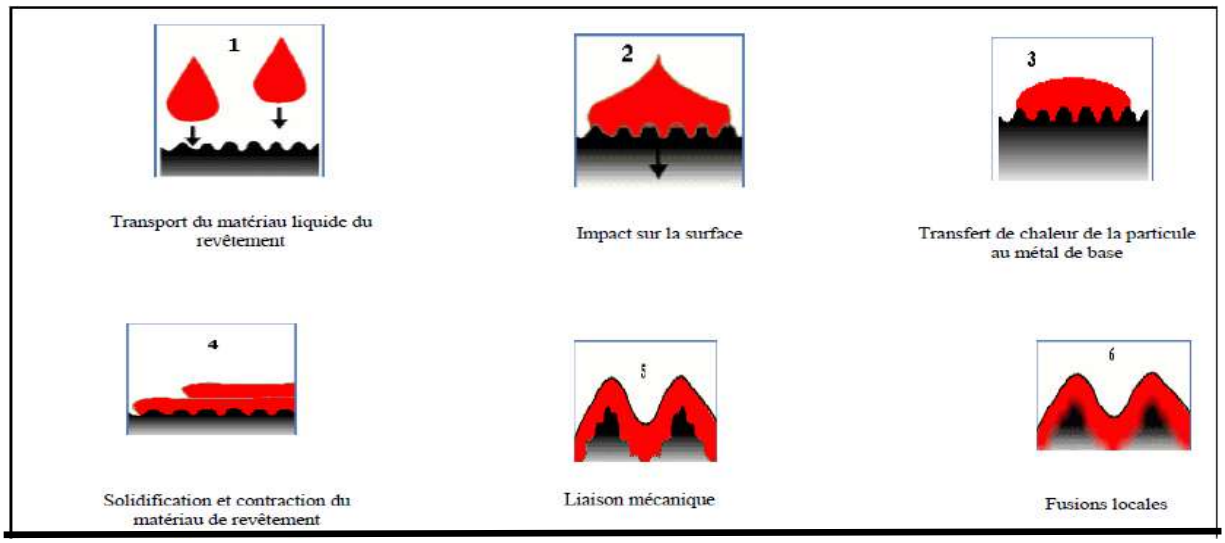


Figure I-26b : processus du dépôt.

I.8.2. 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 **[48, 50]**.

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) **[51, 52]**.

I.8.3. 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 **[48 ,52].** 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 **[53]**.

I.8.4. 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. **[54, 55]**. Cependant, dans le cas des dépôts élaborés par projection a l'arc, l'adhérence est générée essentiellement par trois types de liaisons **[56,57]** :

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 **[58, 59]**.

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 **[60]**.

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 **[57, 52]**.

I.8.5. 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 **[61]**.

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 **[62,63]**.

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 **[64, 65]**.
- 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 **[66, 67]**.

I.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les différentes techniques de Projection thermique. Puis, nous avons détaillé le procédé de la projection par plasma d'arc qui est l'objet des travaux de thèse présentés. Les principaux phénomènes qui régissent la formation du jet de plasma, le traitement de la poudre dans l'écoulement et la construction du dépôt ont été examinés.vue l'état de l'art présente précédemment sur l'oxydation du substrat dans cette étude et dans le même axe nous proposons d'étudiant pas simulation numérique le phénomène d'étalement des particules sur un substrat on présence de couche d'oxyde.

Chapitre II:
Modélisation Mathématique

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.

II.2. Modèle dynamique :

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

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

La formulation mathématique des lois de la conservation régissant les phénomènes physiques comme les écoulements de fluides, est généralement écrite sous forme d'équations aux dérivées [68].

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 [27]:

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

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.

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

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 :

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

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

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 [27]:

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

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 [27]:

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

Après avoir introduise la décomposition de Reynolds on écrit finalement :

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

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 :

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

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

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

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

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

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 [1] : $R_{ij} = \overline{u_j u_l}$

$\frac{d\varphi}{dt}$ 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 [1]

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

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 [1]:

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

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 dans une redistribution d`énergie sur les composantes des tenseurs de Reynolds.schématiquement on écrira [30]

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

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 $R_{IJ}=U_JU_I$

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

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

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 [30]:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\overline{Uk}\frac{\partial k}{\partial xk}=p+D-\varepsilon+V\frac{\partial^2K}{\partial xk\partial xk} \quad \text{(II-16)}$$

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 :

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

Et prenant la moyenne, on obtient le résultat final après quelques regroupements simple [56]:

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

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 [27] 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 :

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

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 zéro 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 [27]:

$$V = Lm \sqrt{(2dij)^2} \quad \text{(II-22)}$$

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

$$VT = LmV = Lm^2\left(\sqrt{\frac{\overline{OCl}}{OXj}} + \sqrt{\frac{\overline{OCl}}{OCi}}\right)^2 \quad \text{(II-22-a)}$$

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 Kolmogorov-Prandtl [1].

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

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

II.2.7.3. Modèle Algébrique aux tensions de Reynolds (ASM) :

A partir des équations de Reynolds, Robin (1972) n'a proposé que le transport (Convection plus diffusion) des contraintes de Reynolds est proportionnel a celui de l'énergie cinétique turbulente on a [27] :

$$\frac{\partial(\rho Uk\,\overline{UiUj})}{\partial xk} - D_{ij} = \frac{\overline{UiUj}}{k}(P_K - \rho\varepsilon) \qquad \text{(II-24)}$$

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 :

$$\frac{\partial(\rho Uk\,\overline{UiUj})}{\partial xk} = D_{ij} + P_{ij} + R_{ij} = \frac{2}{3}\rho E\delta ij \qquad \text{(II-25)}$$

Ou [4], [5]

$$\overline{U_I U_J} = k\left(\frac{\frac{2}{3}\delta_{IJ} + ((C_1 - C_2)\left(\frac{P_{ij}}{\varepsilon} - \frac{2P_K}{3\varepsilon}\delta_{ij}\right))}{(\rho c_1 + \frac{p_k}{\varepsilon} - \rho)}\right) \qquad \text{(II-26)}$$

Avec :

Ou :

$$P_{ij} = -\rho\overline{UiUk}\frac{\partial U}{\partial xt} - \rho\overline{UiUj} - \frac{\partial Ui}{\partial xk} \qquad \text{(II-27)}$$

La sommation de [II-17] donne la production d'énergie turbulente :

Ou :

$$Pk = \frac{1}{2}P_{ij} \qquad \text{(II-28)}$$

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

$$R_{ij} = R_{ij,1} + R_{ij,2} + R_{ij,W} \qquad \text{(II-29)}$$

Ou :

$$R_{ij,1} = C_1\rho\varepsilon\left(\frac{\overline{UiUj}}{k} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\right) \qquad \text{(II-30)}$$

$$R_{ij,2} = -C_2\left(P_{ij} - \frac{2}{3}Pk\delta ij\right) \qquad \text{(II-31)}$$

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

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

$$R_{11,w} = \left\{2C'_1\frac{\varepsilon}{K}V'^2 - C_2C'_2(P_{22} - \frac{2}{3}P_K)\right\} f \qquad \text{(II-32)}$$

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

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

Et le terme F est donnée par:

$$F = \frac{k^{3}/_{2}}{2\varepsilon xn} \quad \text{(II-33)}$$

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

$$\frac{\partial}{\partial xi}(\rho UK) = \frac{\partial}{\partial xk}\left(C_k \frac{k}{\varepsilon} \overline{UkUi} \frac{\partial k}{\partial xi}\right) + P_k - \rho\varepsilon \quad \text{(II-34)}$$

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

$$\frac{\partial}{\partial xi}(\rho U1\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial xk}\left(C\varepsilon \frac{k}{\varepsilon} \overline{UKUJ} \frac{\partial \varepsilon}{\partial xJ}\right) + \frac{\varepsilon}{K}(C\varepsilon 1Pk - C\varepsilon 2\rho\varepsilon) - \rho\varepsilon \quad \text{(II-35)}$$

Tableau II-2 : 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 :

$$\alpha i1\,\overline{U'^2} + \alpha_{i2}\overline{U'^2} + \alpha i3\overline{U'V'} + \alpha_{i4}\overline{W'^2} = b_i \quad \text{(II-36)}$$

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 :

$$\begin{pmatrix} \alpha 11 & \alpha 12 & \alpha 13 \\ \alpha 21 & \alpha 22 & \alpha 23 \\ \alpha 31 & \alpha 32 & \alpha 33 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \rho\overline{U^2} \\ \rho\overline{V^2} \\ \rho\overline{W^2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \end{Bmatrix}$$

Où les coefficients sont définis tel que :

$$\alpha ij \leq 0 \quad \text{pour} \quad i \neq j \quad \text{(II-38)}$$

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 :

$$\overline{U'V'} = -\frac{\alpha 31}{\alpha 33} U'^2 - \frac{\alpha 33}{\alpha 33} V'^2 - \frac{\alpha 32}{\alpha 33} W'^2 - \frac{b3}{\alpha 33} \quad \text{(II-39)}$$

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 [27].

$$\rho \mathrm{Cp}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(\mathrm{VT})\ \mathrm{T}\nabla\mathrm{V}\right) + \alpha \mathrm{T} = \nabla(\lambda \nabla T) + \emptyset + \mathrm{S} \qquad \text{(II-40)}$$

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 :

$$\emptyset = 2\mu \mathrm{Dij}\frac{\partial Ui}{\partial xi} \qquad \text{avec} \qquad \mathrm{D_{i\,j}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right) \qquad \text{(II-41)}$$

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 :

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + u.\nabla\alpha_k = 0 \qquad \text{(II-42)}$$

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 :

$$\rho = \sum \alpha_k \rho_k \qquad \text{(II-43)}$$

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

$$\mu = \frac{\sum \alpha_k \rho_k \mu_k}{\alpha_k \rho_k} \qquad \text{(II-44)}$$

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) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla.(uu) = -\frac{1}{\rho}(\nabla\rho + \mu\nabla^2 u) + \frac{1}{\rho}F_{SF} \qquad \text{(II-45)}$$

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 :

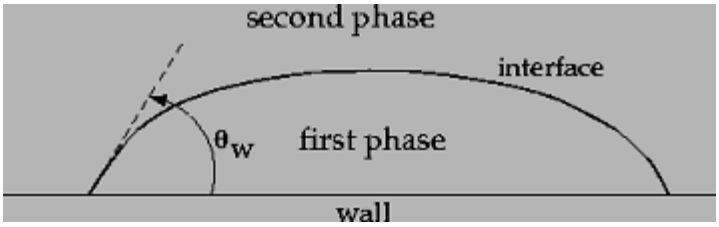
La tension inter faciale est due aux forces cohésives qui existent entre molécules voisines d'une phase condensée, et tend à minimiser l'aire de l'interface entre ces molécules et celles d'une autre phase. Ainsi, elle s'oppose à la déformation de l'interface. Cette force est à l'origine des phénomènes 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 :

$$P_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad \text{(II-46)}$$

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 :

$$F_{SF} = \sigma\, k\, n \frac{\alpha_1\rho_1+\alpha_2\rho_2}{\frac{1}{2}(\rho_1+\rho_2)} \quad \text{(II-47)}$$

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

$n = \nabla\alpha_2$

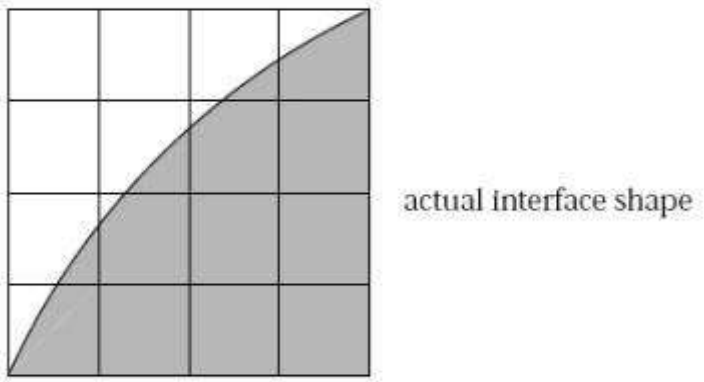
$K = -(\nabla.\hat{n}) = \left(\left(\frac{1}{|n|}\frac{n}{|n|}.\nabla\right)|n| - (\nabla.n)\right)$

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

$$\hat{n} = \widehat{n_w} \cos\theta_w + \widehat{t_w} \sin\theta_w \quad \text{(II-48)}$$

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.



II-5 Modélisation biphasique liquide/solide : [68]

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

$$\alpha_i(X,t) = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad X \in \Omega_i \\ 0 & \text{si} \quad X \in \Omega \setminus \Omega_i \end{cases} \quad , i \in \{l,s\}$$

$$\alpha_l = \alpha \text{ et } \alpha_s = 1 - \alpha \tag{II-49}$$

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

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

II.5.1 Lois de comportement et couplage cinématique :

En négligeant les termes d'inertie (approximation licite en injection de polymère) et décomposant les contraintes en contribution liquide et solide, l'équilibre dynamique du milieu est équivalent à un système de deux équations d'équilibre, l'une liquide, l'autre solide :

$$\left.\begin{array}{l}\nabla.\sigma = 0 \\ \sigma = \sigma_l + \sigma_s\end{array}\right\} \Rightarrow \nabla.\sigma_l = -\nabla.\sigma_s = F \Rightarrow \left\{\begin{array}{l}\nabla.\sigma_l = F \\ \nabla.\sigma_s = -F\end{array}\right. \quad \text{(II-50)}$$

Nous associons à chaque phase une loi de comportement spécifique. Il vient alors :

Le domaine liquide Ωl

On a un liquide newtonien qui vérifie les équations de Stokes :

$$\left\{\begin{array}{ll}\nabla.\big(2\eta\epsilon(v)\big) - \nabla p_l & = F \\ -\nabla.v & = 0\end{array}\right. \quad \text{(II-51)}$$

Le domaine solide élastique Ωs

La loi de comportement linéarisée d'un solide élastique, sous l'hypothèse des petites déformations, est décrite ici dans le cadre d'une formulation mixte déplacement(u)/pression(Ps) via l'introduction du module de compressibilité

K = $\frac{3\lambda+2\mu}{3}$ (λ et μ coefficients de Lamé)

$$\left\{\begin{array}{rl}\nabla.(2\mu\epsilon(u) - \frac{2\mu}{3}(\nabla.u)I) - \nabla p_s & = -F \\ -\nabla.u - \frac{1}{K}p_s & = 0\end{array}\right. \quad \text{(II-52)}$$

On choisit de modéliser F par une force de friction. Cette force, entre un solide soumis à un déplacement u et un liquide de vitesse v, s'exprime par :

$$F = k(v_s - v) = k\left(\frac{\mathbf{d}u}{\mathbf{d}t} - v\right) \quad \text{(II-53)}$$

avec k coefficient d'interaction entre les phases. Cette force agit à l'interface (diffuse ou non) liquide solide.

II.5.2 Système biphasique unique :

Le système décrivant l'ensemble des variables cinématiques du problème s'obtient en exprimant les systèmes (II-51) et (II-52) sur Ω et en définissant une équation d'évolution sur α. On obtient alors :

∀ X ∈ Ω(X, t), trouver (v, Pl, u, Ps, α) /

$$\begin{cases} \alpha\nabla.\big(2\eta\epsilon(v)\big) - \nabla p_l = k\big(\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - v\big) & \text{II-54.1} \\ -\nabla.v = 0 & \text{II-54.2} \\ (1-\alpha)\nabla.\big(2\mu\epsilon(u) - \dfrac{2\mu}{3}(\nabla.u)I\big) - \nabla p_s = -k\big(\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - v\big) & \text{II-54.3} \\ -\nabla.u - \dfrac{1}{K}p_s = 0 & \text{II-54.4} \\ \dfrac{d\alpha}{dt} = f(X,t) & \text{II-54 .5} \end{cases} \quad \text{(II-54)}$$

Dans ce système, les champs (v, pl, u, ps) sont définis sur l'ensemble du domaine car la relation de couplage est également étendue à tout le domaine et permet d'assurer le prolongement de ces champs sur les sous-domaines de Ω tels que α = 0 ou 1.

II.5.3 Formulation éléments finis et méthode de résolution :

La résolution de l'équation d'évolution de α est découplée du système II-54. Connaissant α en chaque point du domaine, on calcule, à partir d'un unique système les quatre inconnues cinématiques du problème.

$$\begin{bmatrix} A_l + F_k & B_l & -F_k & 0 \\ {}^tB_l & -D_l & 0 & 0 \\ -{}^tF_k & 0 & A_s + F_k & B_s \\ 0 & 0 & {}^tB_s - C_s & -D_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v \\ p_l \\ u \\ p_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_k \\ 0 \\ F_k \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{(II-55)}$$

L'obtention du système se fait via une discrétisation éléments finis P1+/P1/P1+/P1. La condensation des termes de bulles, effectuée sur les sous-blocs liquide et solide, génère les matrices Dl et Ds. La relation de couplage, au second membre des équations (II-54.1) et (II-54.3), est traiter de manière semi implicite car un schéma explicite est appliqué à la dérivée convective du champ de déplacement.

II.5.4 Extension du modèle au changement de phase :

L'extension du modèle au changement de phase nécessite l'écriture d'un bilan de masse sur l'ensemble du système. On introduit la masse volumique totale par une loi de mélange :

$$\rho = \alpha\rho_l + (1-\alpha)\rho_s \tag{II-56}$$

avec ρl (resp. ρs) masse volumique du solide (resp. liquide).

On peut montrer que la conservation de la masse totale du domaine Ω s'exprime en fonction de l'évolution de la fraction de phase comme suit :

$$\nabla.v + \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = \nabla.v + \frac{1}{\rho}(\rho_l - \rho_s)\frac{d\alpha}{dt}) = 0 \tag{II-57}$$

Nous traduisons la compressibilité de la phase solide par l'équation d'état sur la masse volumique solide suivante fonction le masse volumique du solide au repos :

$$\rho_s = \rho_s^0(1 + \nabla.u) \tag{II-58}$$

En remplaçant l'équation (II54.2) par l'équation (II-57) dans le système biphasique (II-54), on étend le modèle biphasique proposé à des problèmes de type changement de phase.

II.6.Conclusion :

A la fin de ce chapitre nous avons fait un aperçu sur les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes dynamiques. Ainsi que une présentation de la méthode de volume de fluide que nous utilisons pour simuler le problème diphasique.

Chapitre III:
Méthode Numérique

III.1. Introduction :

Pour résoudre un problème de la physique il faut distinguer le modèle physique du modèle mathématique. Le modèle physique est un modèle réel 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. Présentation de la méthode des éléments finis :

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

En résumé, cette méthode nécessite la discrétisation d'un continuum en un modèle composé d'un assemblage d'éléments finis qui possèdent des formes et des tailles variées. De plus, le calcul de la solution nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, tels que :

- La géométrie discrétisée en éléments finis,
- Les contraintes imposées sur le dispositif,
- Les excitations présentes dans le dispositif,
- Les propriétés des matériaux composant le dispositif.

III.3.3.forme générale des équations du système [16] :

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x C\phi\phi)\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_y C\phi\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(T\phi\frac{\partial\phi}{\partial y}) + S\phi \quad \text{(III-1)}$$

Ou :

ϕ : Variable généralisée

$_C\phi$: coefficient d'advection transitoire

$T\phi$: ceofficient de diffusion

$S\phi$: termes source

Le tableau (III-1) 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	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
Vy	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
T	1	$\frac{k}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{\rho c^e}$
ρ	1	0	0

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

La discrétisation de ces équations permet de convertir les équations aux dérivées partielles en équations algébriques qui sont alors résolues par les méthodes numériques traditionnelles. Le procédé de discrétisation par EF consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire [70].

$$([A_B^{transient}] + [A_e^{adverction}] + [A_e^{didffusion}])(\phi e) = (S_e^{\phi}) \quad \text{(III-2)}$$

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

III. 3.3.1. Terme temporelle :

Le premier des contributions de l'élémentaire est le terme de transition, sa forme générale est simplement [16] :

Générale est simplement [16] :

$$[A_e^{transien}] = \int w^e \frac{\partial\rho c\phi}{\partial t}\, d\,(vol) \quad \text{(III-3)}$$

Avec :

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

$$\int w^e \frac{(\partial \rho C \phi \phi)^2}{\partial t} d\,(vol) = \int w_i^e \rho c \phi w_j^e d(vol) \frac{\partial \phi_i^e}{\partial t} + \int w_i^e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} w_j^e \, d\,(vol)\, \phi_j^e \qquad \text{(III-4)}$$

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 :

$$Mij = \int w_i^e \ \rho \ c\phi w_j^e \, d\,(vol) \qquad \text{(III-5)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée

$$Mij = \delta ij \int w_i^e \ \rho c\emptyset \, d\,(vol) \qquad \text{(III-6)}$$

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

$$(\rho\emptyset)n=(\rho\emptyset)_{n-1}+ \nabla t[\delta(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}) + (1-\delta) (\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{n-1} \qquad \text{(III-7)}$$

Ou :

δ= coefficient d'intégration de temps pour la méthode newmark l'équation (III-6) est écrite comme suite :

$$(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_n= \frac{1}{\nabla t\delta}(\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\nabla t\delta}(\rho\emptyset)_{n-1} + (1 - \frac{1}{\delta}) \qquad \text{(III.8)}$$

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

$$\left(\frac{\partial(\rho\ell)}{\partial t}\right) = \frac{(\rho\emptyset)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\emptyset)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\emptyset)_n}{2\Delta t} \qquad \text{(III.9)}$$

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

$$\left(\frac{\partial(\rho\ell)}{\partial t}\right) = \frac{(\rho\emptyset)_n}{\Delta t} - \frac{(\rho\emptyset)_{n-1}}{\Delta t} \qquad \text{(III-10)}$$

L'arrangement de premier ordre ci-dessus de différence de temps est choisi pour être conformé à l'algorithme courant d'advection de VOF.

La nième étape de fois produit une contribution à la diagonale de la matrice élémentaire, alors que les dérivés de l'étape précédente de temps forment des contributions au terme source .

III.3.3.2. Terme d'advection:

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

III.3.3.2.1. monotone streamline upwind approach (MSU):

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

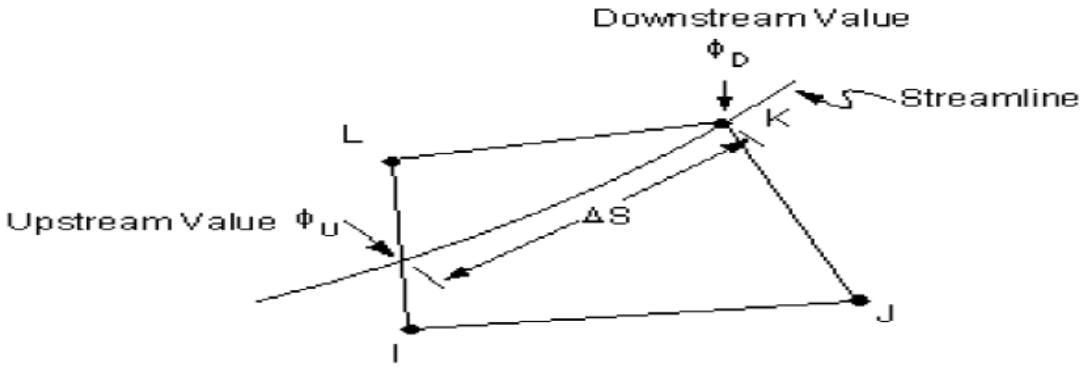


Figure. III-1:l'approche de ligne de courant d'upwind.

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 [16] :

$$\frac{\partial(\rho VxC\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\emptyset\emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho VsC\emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III-11)}$$

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

$$[A_e^{advection}] = \frac{d(\rho VsC\emptyset\emptyset}{dy} \int w^e \, \mathrm{d(vol)} \qquad \text{(III-12)}$$

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 :

$$\frac{d(\rho VsC\emptyset)}{ds} = \frac{(\rho VsC\emptyset)u}{Ds} \qquad \text{(III-13)}$$

Ou :

D : l'indice de la valeur on niveau du nœud aval.et les approches colloquées de Galerkin (COLG).

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 nœuds voisins.

III.3.3.2.2. La méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin) :

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection [33]

$$[A_e^{advection}] = \int w^e \left\{ \frac{\partial(\rho Vx C \emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Vy C \emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\} d(vol) + C_2\tau \int \frac{zh}{2u\,mag} \left\{ Vx\frac{\partial w^e}{\partial x} + Vy\frac{\partial w^e}{\partial x} \right\} \left\{ Vx \frac{\partial(\rho C \emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Vy C \emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\} d(vol) \quad \text{(III-14)}$$

Ou :

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

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

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

$Pe = \frac{\rho C p U mag}{2T}$ 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.3.3.2.3.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 [16].

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

$\left\{ \frac{V_x^e \partial(\rho C\,\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho C\,\emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\}$ d (vol) (III-15)

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.3.3.3.terme de diffusion :

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au –dessus du domaine .De problème après la multiplication par la fonction pesante [16].

Diffusion contribution $= \int w^e \frac{\partial}{\partial x}(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x})$ d (vol) + $\int w^e \frac{\partial}{\partial y}(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y})$ d (vol)) (III-16)

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 [16] :

$\int w^2 \frac{\partial}{\partial x}(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x})$ d (vol) = $\int \frac{\partial w^2}{\partial x}(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x})$ d (vol) (III-17)

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

$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = w_x^e \emptyset$ (III-18)

$w_x^e = \frac{\partial w^2}{\partial x}$ (III-19)

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme

$[A_e^{diffusion}] = \int w_x^e\ T\emptyset\ w_y^e T\emptyset)$ d (vol) (III-20)

III.3.3.5. termes source :

L'évaluation des termes de source se fait comme suite [16] :

$s_\emptyset^e = \int w^e\ S\emptyset$ d (vol) (III-21)

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

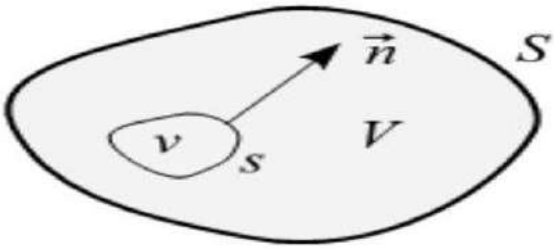


Figure III-2 : bilan thermique

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 [27] :

$$\int \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -n\,(-\overline{\lambda grad} T)\, ds \qquad \text{(III-22)}$$

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

$$\rho C_p \dot{T} - \text{div}(\overline{\lambda grad} T)\, q = 0 \qquad \text{(III-23)}$$

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

$$\rho C_p \dot{T} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \qquad \text{(III-24)}$$

III.4. Méthodes de discrétisations :

L'ensemble des étapes de résolution des équations différentielles par la voie numérique s'appelle méthode de discrétisation. La mise en œuvre d'une méthode numérique de calcul des champs débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé, on peut écrire pour chaque problème un programme qui tient compte de sa géométrie, ses propriétés physiques et ses conditions aux limites. Il existe aujourd'hui des logiciels généraux appropriés nommés techniques de la CAO dont les structures informatiques sont adaptées aux traitements d'un grand nombre de problèmes d'un même type tels que PDETOOL sous MATLAB, ANSYS, MEGA…

- Description du problème (Géométrie, caractéristiques physiques, maillage, limites du domaine d'étude).
- Mise en œuvre de la méthode numérique de simulation (Différences finies, éléments finis, volumes finis, intégrales de frontière) plus une méthode itérative

III.4.1.choix d'un maillage :

La méthode des éléments finis repose sur découpage de l espace selon un maillage d'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'in territ de choisir des maillage plus complexe, il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage prés des endroits d'in tétères (par exemple aux endroits ou l'on pense que la solution va beaucoup varier) ,cependant il faut veiller à avoir des «éléments faiblement Distordus (se rapprocher d'un polygone régulier),plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l »équation aux dériva ès partiels. même si une géométriquement complexe peut être maillée avec des éléments tétraédriques, elles mais exigent de nombreux

éléments et que mai conduire à lécha parce que la simulation des ressources informatiques même un volume de forme régulière mai exigent de nombreux éléments tétraédriques si elle a un ratio très grand aspect ,ici les éléments hexaèdres ou d'un coin serait un meilleur choix ,(figure III-3) « objet avec un aspect Ratio large », illustre cette différence, il montre que le nombre d »éléments tétraédrique (a) est beaucoup plus grand quelle nombre d »élément hexaédrique (b), si une densité de maillage similaire est maintenue sur la section transversal

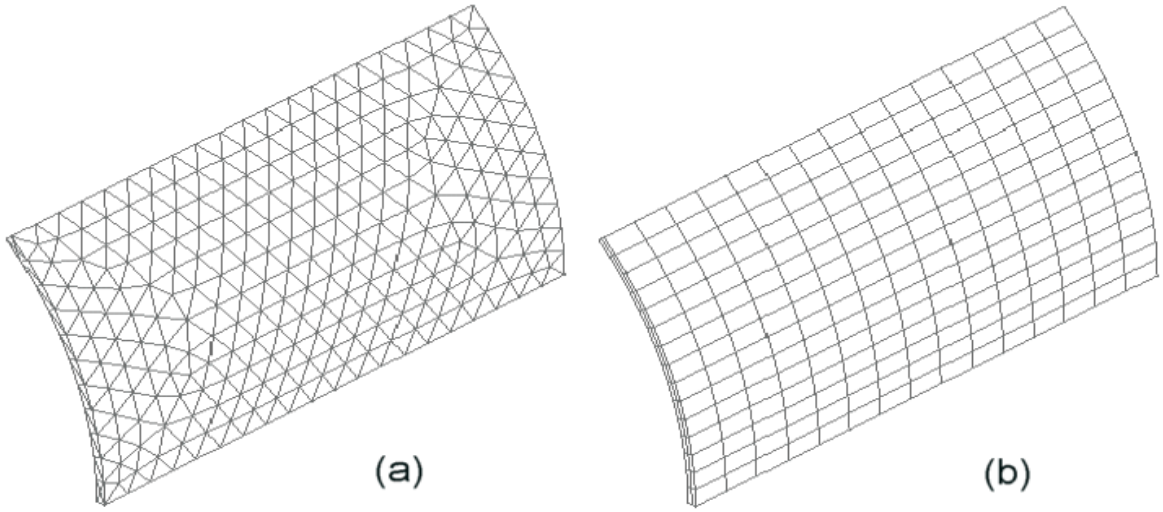


Figure III-3 : (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique

III.4.2. Méthodes de calcul d'interface :

La résolution des problèmes diphasiques avec des fluides non miscibles pose le problème de la présence d'une interface séparant les fluides. Pour déterminer entièrement l'écoulement, est nécessaire :

• de résoudre les équations du mouvement dans les deux phases,

• de représenter l'interface dans l'espace,

• de caractériser le mouvement de l'interface, sachant que sa dynamique est étroitement liée à celle des fluides environnants.

III.4.3. Evolution de la Surface Libre :

Le choix d'une méthode numérique dépend étroitement du type de problème considéré. Il existe deux types de méthodologies différentes pour résoudre les problèmes diphasiques : la méthode Lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode Eulérienne (sur maillage fixe).

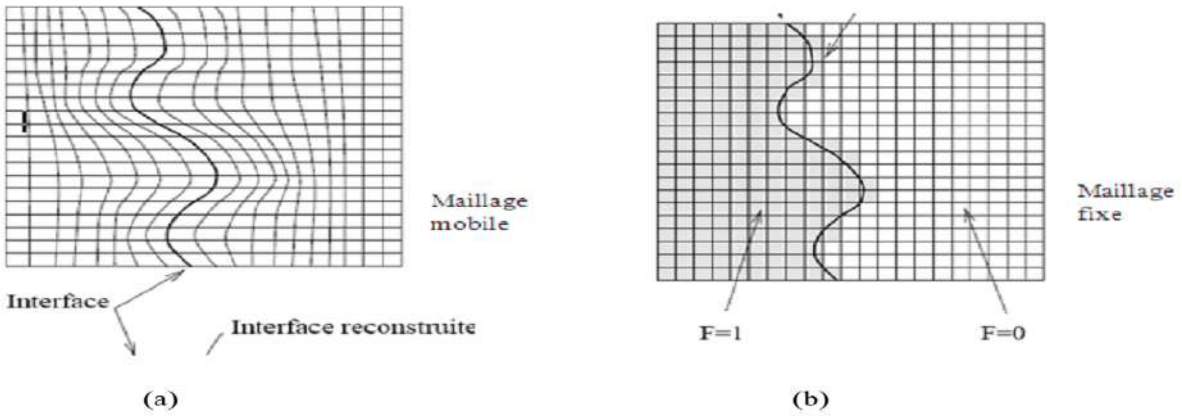


Figure III-4 : Présentation des méthodes de calcul d'interface
a)méthode Lagrangienne, b) méthode Eulérienne, [4].

- **Méthode Lagrangienne (maillage mobil) :** Elle consiste a discrétiser un seul des deux fluides en présence, et considérer l'interface des deux fluides comme condition limite du problème. Les équations de Navier-Stokes dans ce domaine permettent le mouvement de ce milieu sans prendre en compte l'autre fluide. Ce la nécessite un maillage adaptatif qui suit les déformations de l'interface. L'intérêt de ce type de méthode est de fournir avec précision l'évolution de la surface libre en fonction du temps et grâce à un maillage évolutif, de raffiner localement t pour améliorer la précision des phénomènes liés à l'interface. Les inconvénients de cette méthodologie résident dans le cout et le temps de calcul nécessaire à la reconstruction de l'interface et des conditions limites du système à chaque pas de temps. D e plus, cette méthodologie n'est pas bien adaptée aux problèmes de rupture de fluide que l'on rencontre par exemple lors du splash qui génère des gouttes secondaire.
- **Méthodes Eulérienne (maillage fixe) :** Elle consiste à discrétisé les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides. L'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la précédente. De plus, les phénomènes de rupture d'interface ne ce posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numériques ont été réalisées grâces à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, la seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première [4]. Ce pendant, de part sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation couleur.

Les écoulements considérés dans cette étude mettent en présence deux fluides non miscibles. Il existe donc une interface de discontinuité qui sépare ces deux fluides newtoniens Incompressibles (ou newtoniens généralisés incompressibles). L'interface est reconstruite à partir du changement des propriétés physiques. Un des inconvénients de la méthode vient du non connaissance explicite de la position de l'interface. On retrouve pour ces méthodes eulériennes deux grandes familles, les méthodes de suivi de front et les méthodes de suivi en volume, plus Communément appelées méthodes VOF, qui nous intéressent ici. Où On trouve principalement deux méthodes pour résoudre l'équation de transport de la fonction couleur, une méthode avec reconstruction d'interface et l'autre sans reconstruction d'interface.

III.4.3.1 Méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface:

Marqueurs de surface : Daly [4] présente une méthode pour suivre une interface sur un maillage fixe : cette méthode permet de suivre la surface libre en marquant l'interface avec des particules sans masse. Le champ de vitesse local est alors utilisé pour adéquater ces traceurs par une méthode lagrangienne classique (figure III-5)

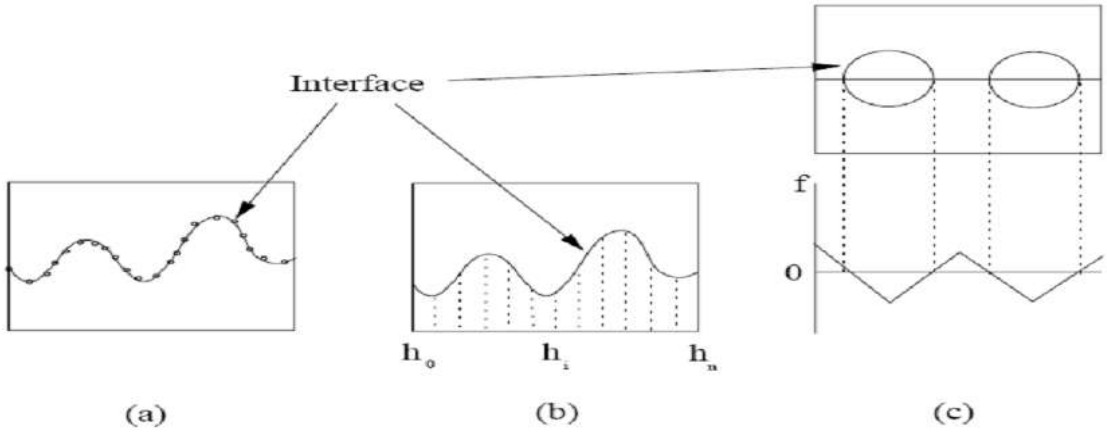


Figure III-5 : Différentes méthodes de suivi de front

a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau, [4].

III.4.3.2 Les méthodes de suivi de volume :

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

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluide) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide [4].

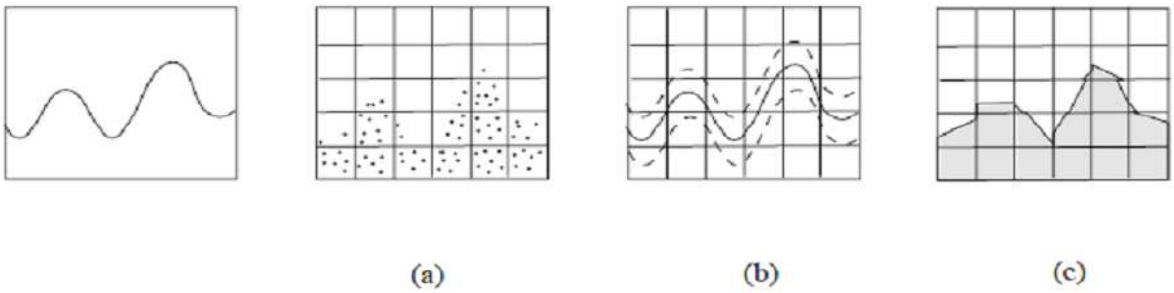


Figure III-6 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque (a) Méthode MAC, (b) schéma TVD et (c) Méthode VOF d'ordre 2, [4].

III.5. La Méthode VOF CIAM :

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

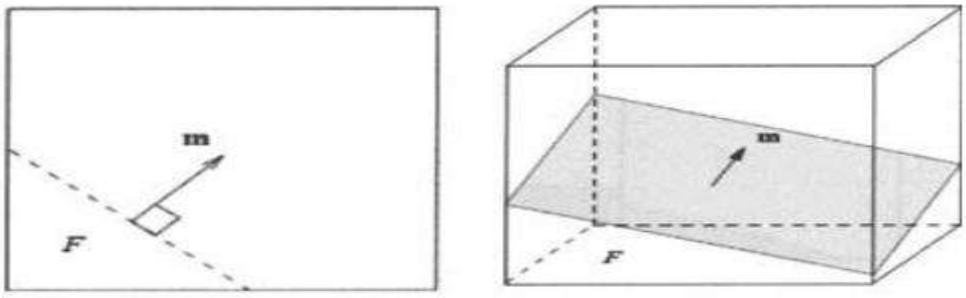


Figure III-7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique.

Méthodes de ligne de niveau ("level set") :

Utilise la fonction de phase comme la distance par rapport à l'interface [4]. Cette méthode a été introduite par Osher et Sethian [4], elle représente l'interface comme une ligne de niveau d'une fonction 9 en fonction du temps et de l'espace. L'évolution au cours du temps de la fonction 9 est régie par l'équation hyperbolique :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathcal{U}.\nabla\varphi = 0 \qquad \text{(III-25)}$$

Où $\mathcal{U}$ est la vitesse du fluide.

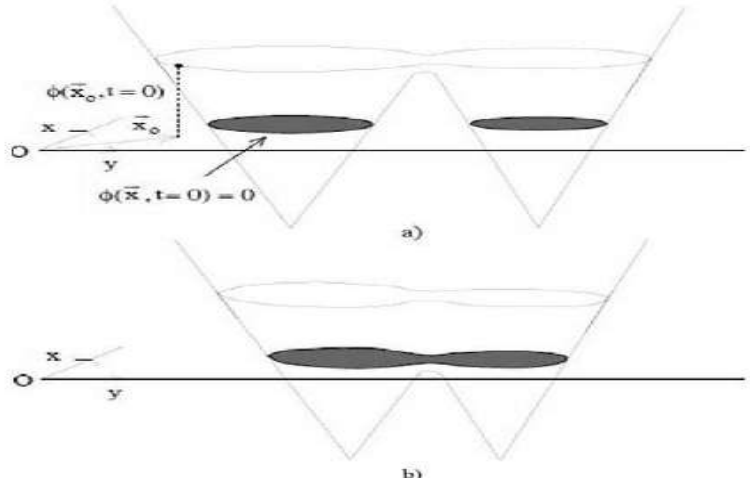


Figure III-8: Changement de topologie de l'interface dans "level set ".

Les interfaces sont définies par la fonction. a) t = 0. En gris, deux sous domaines non connexes, b) t=Δt, la topologie a changé. Il n'existe plus qu'une seule interface et un seul domaine connexe [88].L'avantage de cette dernière méthode est d'être facilement généralisable au cas tridimensionnel, et aussi aux changements de topologie et les reconnexions d'interfaces s'effectuent de façon automatique, Figure III-8 [4]

.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.

Chapitre IV:
Résultats et Discussions

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentant les résultats d'étude de la simulation numériques d'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier comparer avec celle de Java Mostaghimi d'autre part, la simulations numériques d'impact de particule d'aluminium sur substrat d'acier en présence de couche d'oxyde .

IV.2. Logiciel d'analyse d'ANSYS :

ANSYS est parmi le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception (gain de temps). Les industriels conçoivent des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts

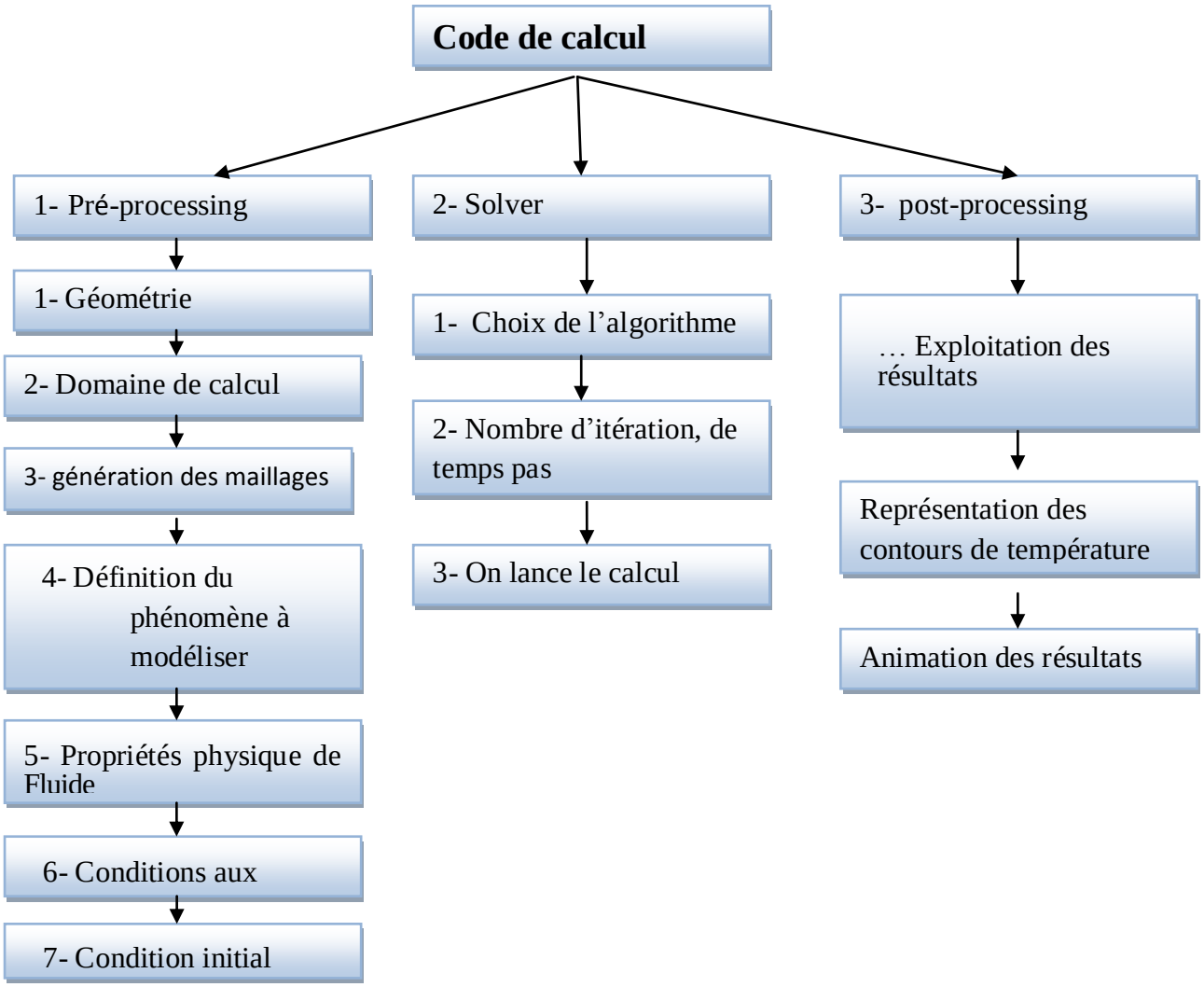


Figure IV-1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS.

IV.3. Matériaux utilisé :

Dans cette étude numérique, nous nous sommes intéressés à des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat acier telle que le travail expérimentale de Java Mostaghimi qui ont été consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'alumine sur substrat en acier ; et qui sera l'objet d'identification de nos résultats.

IV.3.1. L'aluminium : [27]

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

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

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

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

Pour l'aluminium

$\rho=2.79.10^{3}[1-4.22.10^{-5}(T-T_f)]$ **(IV.1) [91,92]**

$\mu=2.87\ 10^{-9}\text{Texp}\ (2.05.10^{4}/T)$ **(IV.2) [91,92]**

Pour l'acier

$\rho=0.9246.10^{4}-1.481T+1.425(T/100)^{2}$ **(IV.1) [91,92]**

$\mu=0.3162.10^{-3}\exp\ (5.004.10^{3}/T)$ **(IV.2) [91,92]**

IV.3.2. le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation :

Propriétés	Particule : Alumine	Substrat: Acier	Couche d'oxydation	unité
Densité	2570	7800	5240	(Kg/m³)
Viscosité (liquide)	°c0 4.5 E-7 700 4 E-7			(m²/s)
Conductivité thermique	70	26	2.9	(W/m K)
Chaleur spécifique liquide	1000		670	(J/Kg K)
Conductivité thermique solide	°c 400 144 500 147 630 70			(W/m K)
Chaleur spécifique	°c 100 400 300 500 400 800 570 1050 580 1038 600 1000	°c 20 460 200 502 500 550		(J/Kg K)

Tableau IV-1 : Les prospérités des mâtereaux utilisés [27].

IV.4 Identification :

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

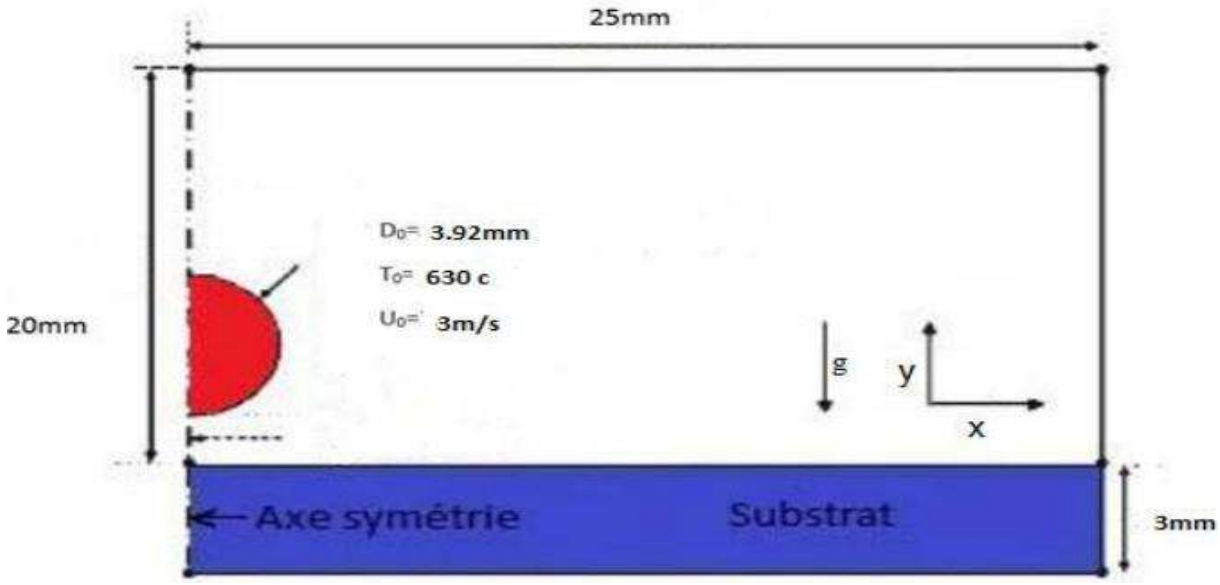
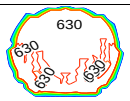
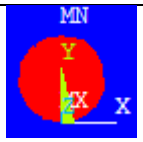
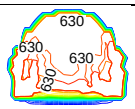
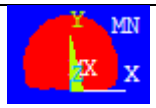
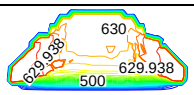
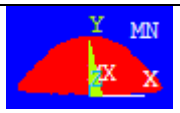
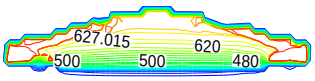
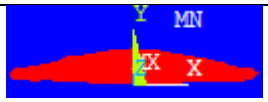
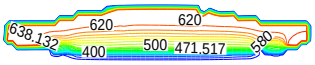
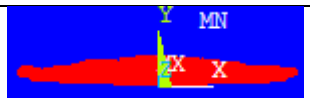
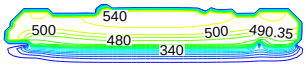
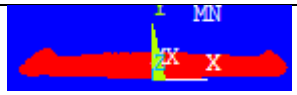
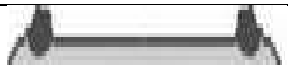


Figure IV– 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de

L'identification.

IV.4.1. Impact d'une particule d'aluminium:

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 -3 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=0.3ms			
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 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C jaus' qua temps d'étalement t=7ms

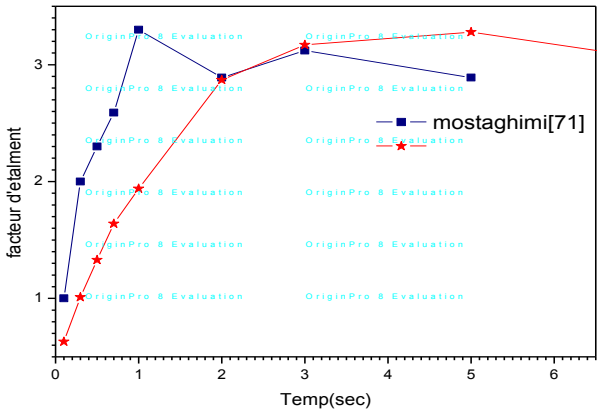


Figure IV- 3. Facteurs d'étalement**.**

la figure IV- 3, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium pour les deux cas ,nous notons qu' aux premiers instants, ces facteurs augmentent rapidement ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande on comparant les deux courbes nous allons remarquer que dans l'expérimentation de Mostaghimi [71] la valeur du

facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 3.3 alors que dans notre simulation elle atteint 3.27 puis les deux courbes diminuent pour se stabiliser à ces valeurs suivantes :pour la courbe de mostaghimi est de 3.12 et pour notre courbe est de 3.07.

IV.5. Oxydation de la surface des substrats métalliques :

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

- **résistance thermique de contact additionnelle**

La formation d'une couche d'oxyde d'épaisseur e_{ox} est supposée contribuer à augmenter la résistance thermique de contact lamelle-substrat d'une quantité égale à $R_{thox}= e_{ox}/k_{ox}$ où k_{ox} est la conductivité thermique de l'oxyde formé à la surface du substrat, et e_{ox} l'épaisseur de cette couche. Qu'eox est de l'ordre de 0.01mm et que la conductivité thermique k_{ox} de cette couche est égale à 2,9 W/m.K, valeur faible comparée à celle de la conductivité thermique de l'acier (26 W/m.K).

Nous prenons comme valeur de la conductivité thermique de la couche d'oxyde celle de l'oxyde de fer Fe_2O_3qui est majoritaire dans cette couche .Ses propriétés physiques utilisées dans les calculs sont présentées dans le tableau IV-3.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Fe_2O_3	2,9	5240	670

Tableau IV-3: Propriétés thermique de Fe_2O_3 utilisé dans les calculs.

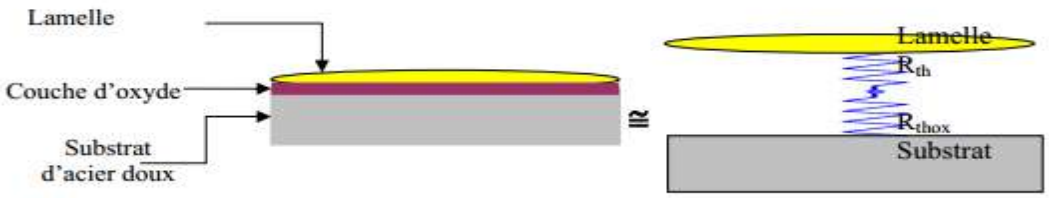


Figure IV-4: Schéma représentant le contact lamelle/substrat après l'oxydation de la Surface.

IV.5.1.configuration etconditions d'étalement avec une couche d'oxydation :

Nous avons tenu compte dans cette partie numérique de la formation d'une couche d'oxyde constituée principalement, après préchauffage au-delà de la température de transition, de l'oxyde de fer Fe2O3 à la surface de l'acier. La couche d'oxyde en effet augmente en épaisseur lorsque les substrats sont préchauffés. Cette épaisseur est de l'ordre de 0.1 à 1.5 mm dans le cas du substrat d'acier préchauffé à 630 °c, et de l'ordre de 0.1mm dans celui de l'acier. Nous avons introduit cette couche d'oxyde dans les calculs de solidification des lamelles d'aluminium projetées sur des substrats métalliques

Pour les calculs, nous avons fixé :

- la température initiale de la gouttelette considérant une particule d'aluminium T=630°c
- la température initiale du substrat T=200°c
- vitesse le la gouttelette 3m/s

IV.6. Description du domaine d'application :

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact de particule d'aluminium déposée sur un substrat d'acier en présence de couche d'oxyde , pour cinq cas (e1,e2,e3,e4,e5) et (r1,r2) possible de présence des pics c'est représente sur la figure (IV– 5).

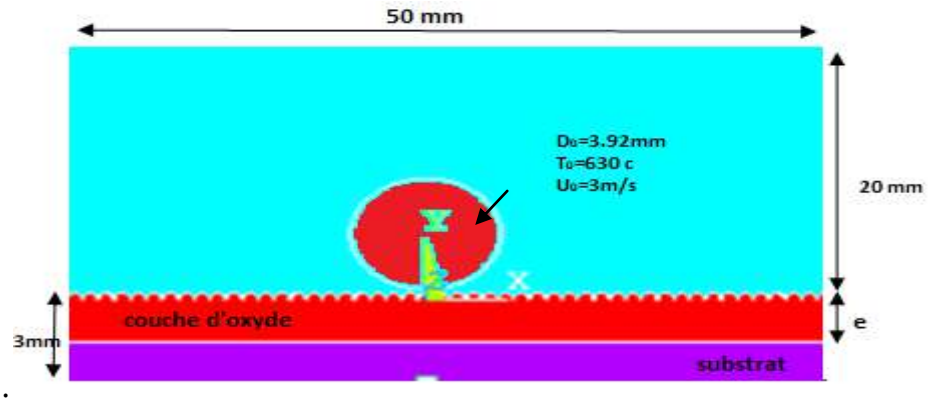


Figure IV-5 : Représentation schématique de domaine

En vue de l'étude de l'influence de la présence de couche d'oxyde avec des pics surfacique sur substrat nous avons proposé cinq couche d'oxyde avec pics cylindrique de différents épaisseurs (0.1et 0.3 et 0.5 et 1 et 1.5mm) 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 points par rapport au temps
- Représente les variations de température pour quatre positions dans le substrat et cela par rapport au temps.

❖ **Cas 1 : e= 0.1mm diamètre les pics d=0.1mm**

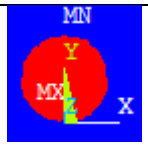
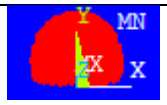
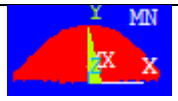
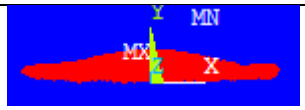
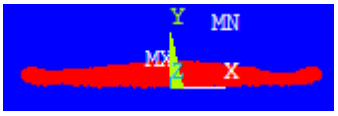
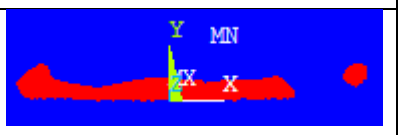
	r= 0.05mm
T=0.1ms	
T=0.3ms	
T=0.7ms	
T=2 ms	
T=3ms	
T=7ms	

Figure IV-6 : Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 0.1mm

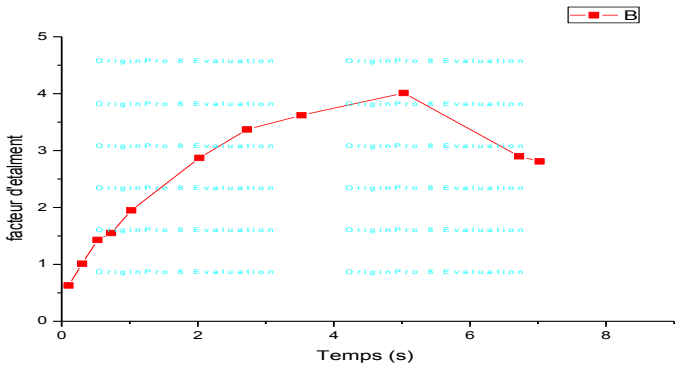


Figure IV– 7 : Résultat facteur d'étalement pour le cas d'une épaisseur de 0.1mm.

La figure IV-7, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium nous notons que ce facteur augmente rapidement aux premiers instants ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande

On remarque que la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 4.01 après il est diminué pour atteindre la valeur 2.81

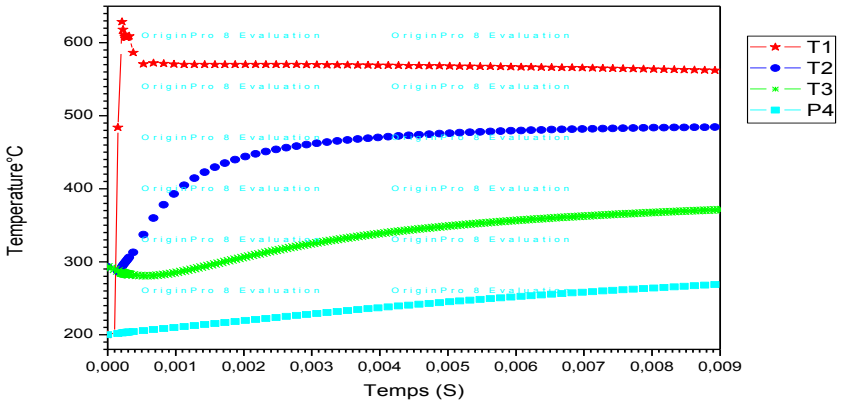


Figure IV-8 : profiles de température en fonction de temps pour quatre position au long de substrats verticalement pour 1er cas.

Cette courbe représente un comportement identique sur le substrat pendant le premier moment de l'impact, on note cependant que dans un second temps un comportement relativement similaire dans l'allure de variation, et on note que les valeurs des températures pour le point de contact sont plus élevées, mais les valeurs des températures des points au-dessous dans substrat diminuées. On peut constater aussi que, aux tous premiers instants suivants le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement (figure IV-8) et la Resistance thermique diminue. Après un étalement partiel, la surface de contact entre le substrat et la goutte augmente, alors que la température du substrat reste quasi constante. La température de substrat augmente beaucoup plus lentement alors que la température de surface de la goutte s'abaisse ; donc la résistance de contact associée augmente, qui favorise la diffusion thermique radiale dans la lamelle.

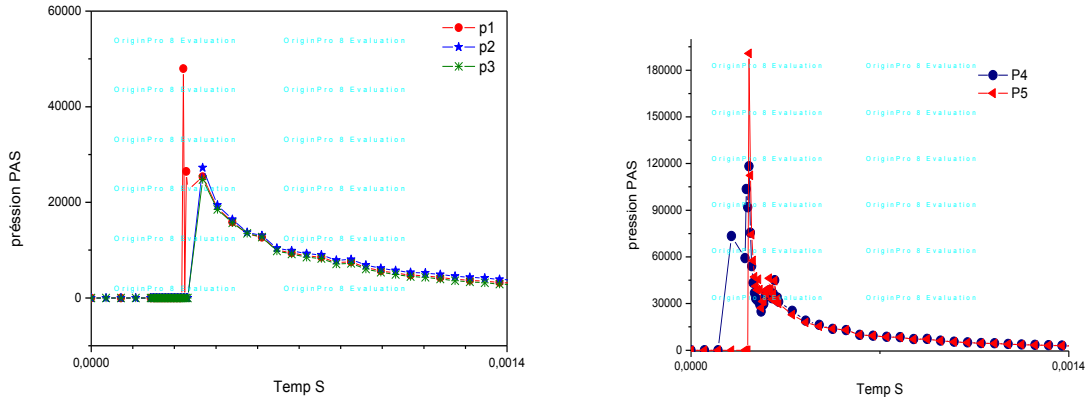


Figure IV-9: la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 0.1mm.

Illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (180 KPa), où il provoque une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les différents cas permet de transférer une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies.

❖ **Cas2 : e= 0.3 mm diamètre des pics d= 0.4 mm**

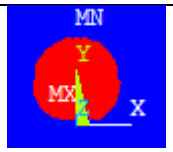
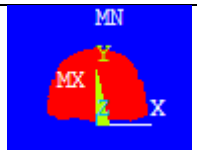
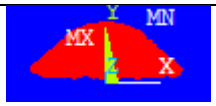
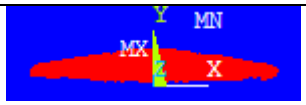
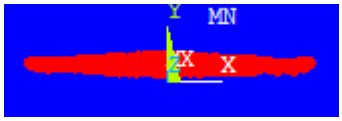
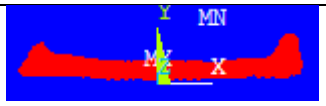
	r= 0.2 mm
T=0.1ms	
T=0.3ms	
T=0.7ms	
T=2 ms	
T=3ms	
T=7ms	

Figure IV-10 : Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 0.3mm.

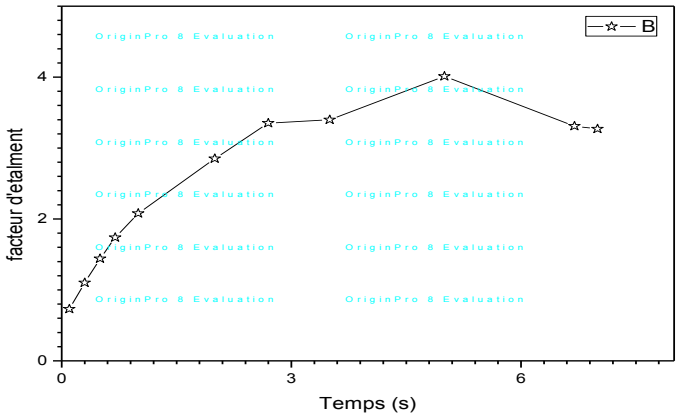


Figure IV– 11 : Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 0.3mm.

L'étalement et la forme de la goutte sont semblables au cours de l'impact. À l'instant t = 0.1ms, la goutte s'étale encore plus rapidement et se commence à prendre la forme

d'une lamelle, après l'instant t=7ms la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement finale On peut voir clairement l'effet des forces visqueuse qui sont corriger après chaque pas de temps sous l'effet de transfert de chaleur dans la particule et la solidification ,avec un front transversal .

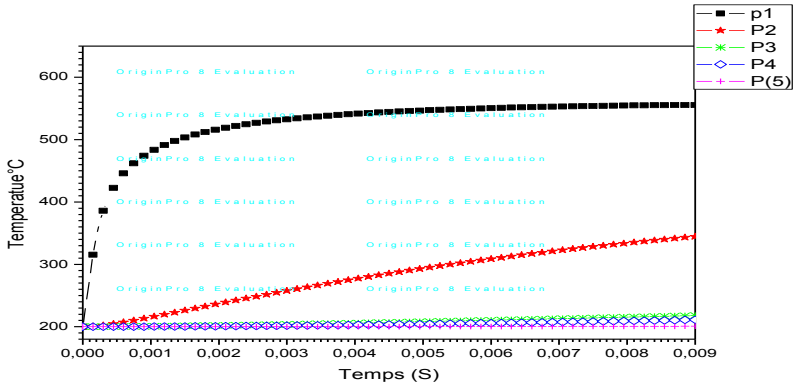


Figure IV-12 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 0.3 mm.

Figure IV-12 représente les résultats numérique des profiles de température en cinq positions dans le substrat, on note que :

- À point1 (P1) sous la ligne d'impact, la température de substrat augmente rapidement puis elle se stabilise et reste constante.
- P2 sous la ligne d'impact, la température s'élève un peu puis elle se stabilise.
- P3, p4 et p5 la température reste constante dès le début de l'étalement et elle est égale à sa température initiale de substrat.

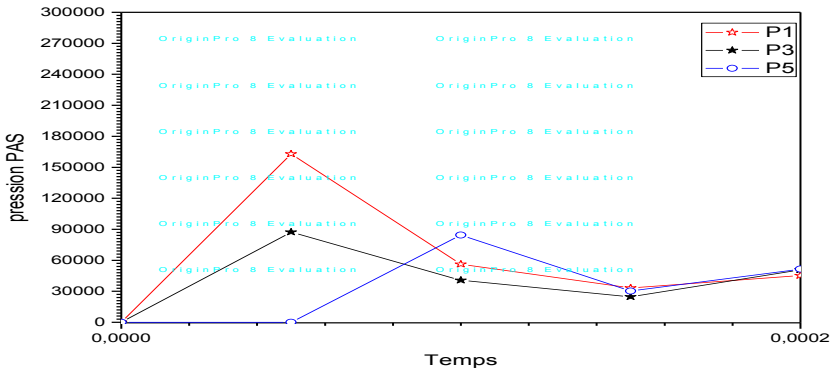


Figure IV-13 : la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 0.1mm.

La figure IV-13: représente la variation de la pression d'impact sur le point de contact, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression jusqu'à (170kPas) beaucoup plus supérieure à la valeur nécessaire à l'accrochage mécanique

❖ **Cas3 : e= 0.5 mm diamètre de les pics d= 0.4mm**

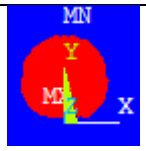
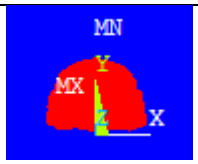
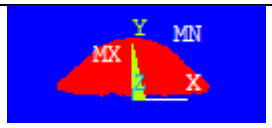
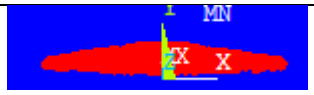
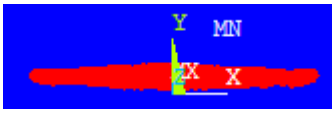
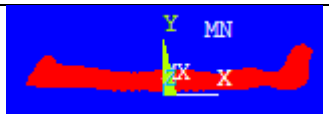
	r= 0.2mm
T=0.1ms	
T=0.3ms	
T=0.7ms	
T=2 ms	
T=3ms	
T=7ms	

Figure IV.14 : Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 0.5 mm.

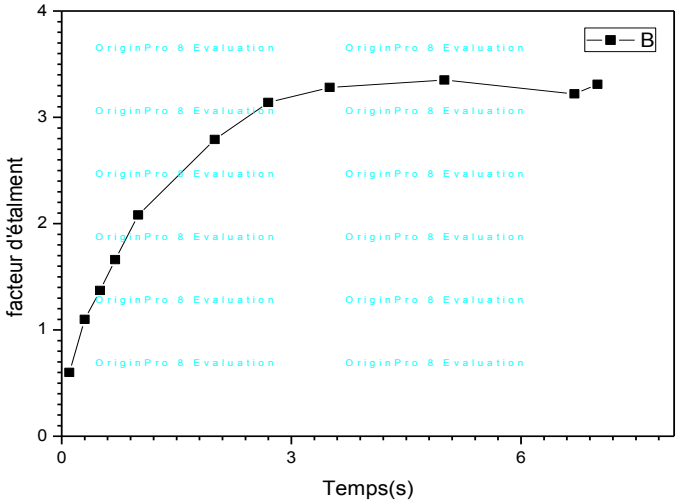


Figure IV– 15 : Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 0.5 mm.

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

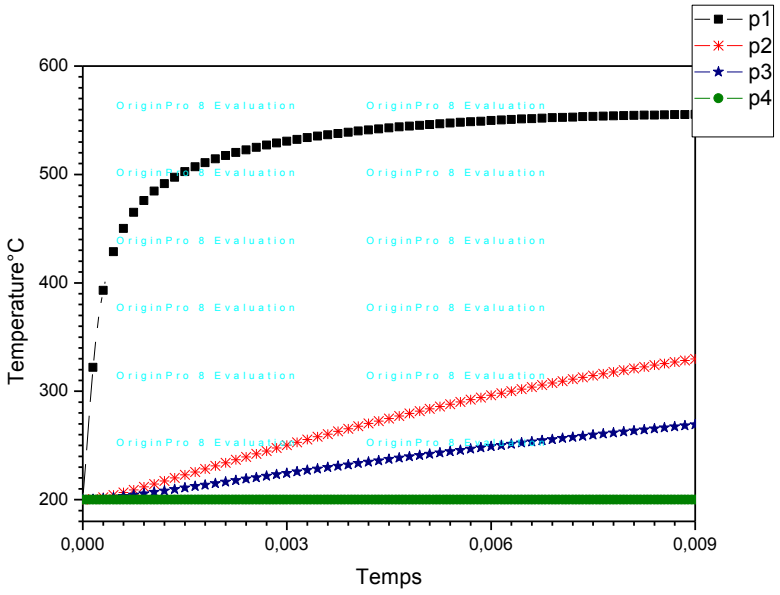


Figure IV-16 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 0.5 mm.

Figure IV-16 représente les résultats numérique des profiles de température en quartes positions dans le substrat, on note que :

- à P1et P2sous la ligne d'impact, la température de substrat augmente rapidement puis elle se stabilise et reste constante.
- P3 sous la ligne d'impact, la température s'élève un peu puis elle se stabilise.
- P4 la température reste constant dès le début de l'étalement et elle est égale à sa température initiale de substrat,

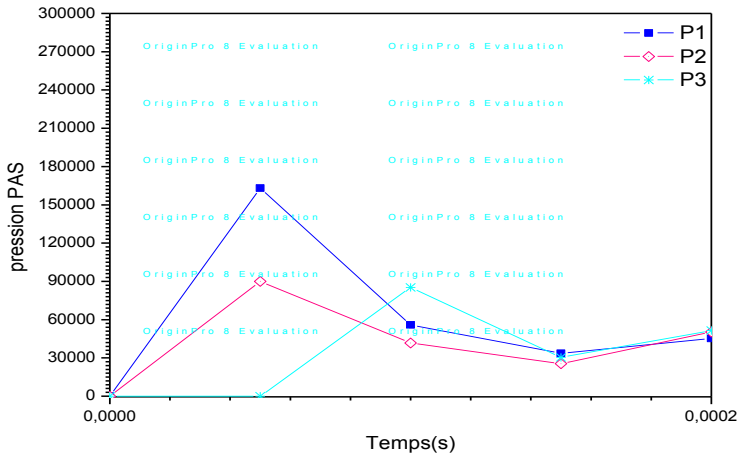


Figure IV-17: la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 0.5mm.

La figure IV-17: représente la variation de la pression d'impact sur le point de contact, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression jusqu'à (170kPas) beaucoup plus supérieure à la valeur nécessaire à l'accrochage mécanique.

❖ **Cas 4 : e= 1mm diamètre de les pics d= 0.4 mm**

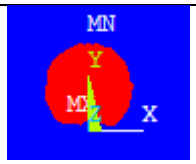
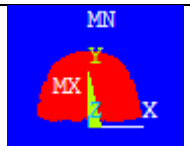
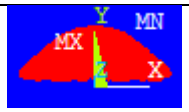
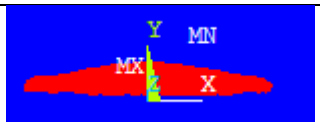
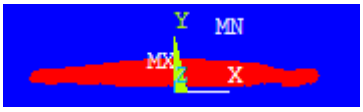
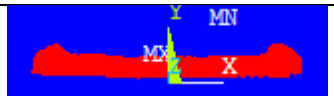
	r= 0.2mm
T=0.1ms	
T=0.3ms	
T=0.7ms	
T=2 ms	
T=3ms	
T=7ms	

Figure IV-18 : Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 1mm.

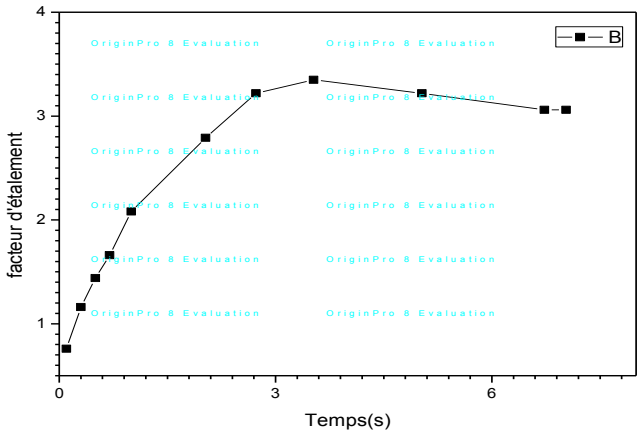


Figure IV– 19 : Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 1mm.

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

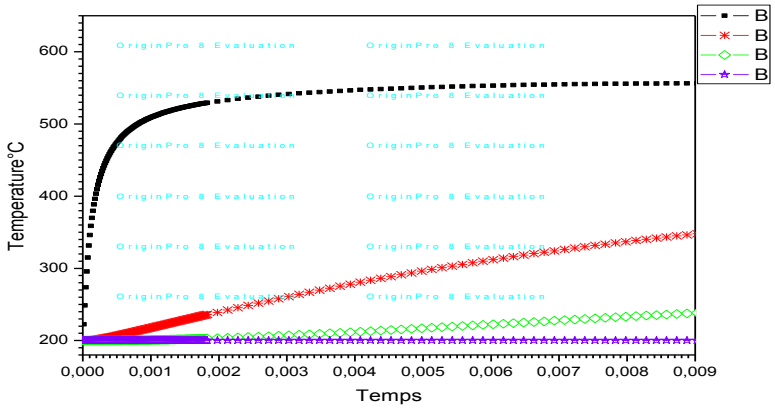


Figure IV-20 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 1 mm.

Figure IV-20 représente les résultats numérique des profiles de température en quartes positions dans le substrat, on note que :

- à P1etP2 sous la ligne d'impact, la température de substrat augmente rapidement puis elle se stabilise et reste constante.
- P3 sous la ligne d'impact, la température s'élève un peu puis elle se stabilise.
- P4 la température reste constante dès le début de l'étalement et elle est égale à sa température initiale de substrat.

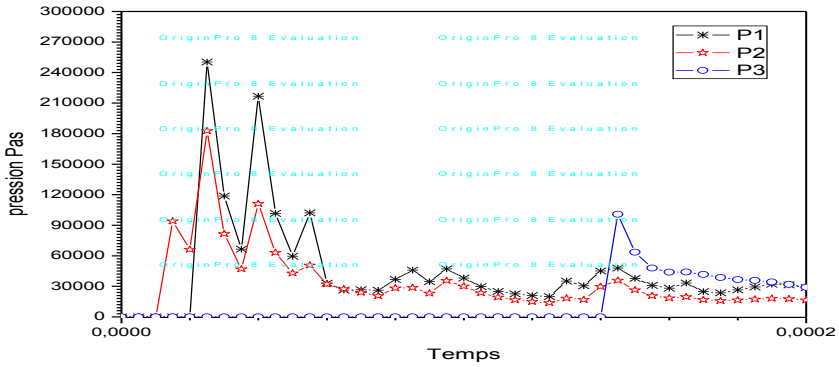


Figure IV-21: la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 1mm.

La Figure IV-21, illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (244 KPa), où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, l'augmentation de pression à l'impact dans le deuxième et le troisième points (P1et P2) sont plus grande que celle dans le point (P3), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ces points est bonne que dans le premier point.

❖ **Cas 5 : e= 1.5 mm diamètre des pics d= 0.4 mm**

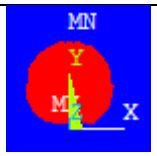
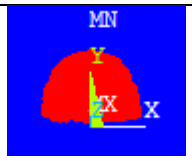
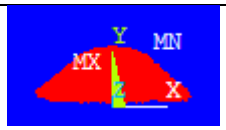
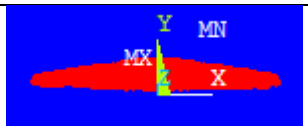
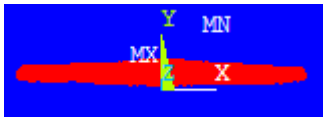
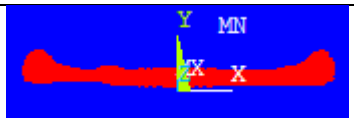
	r= 0.2mm
T=0.1ms	
T=0.3ms	
T=0.7ms	
T=2 ms	
T=3ms	
T=7ms	

Figure IV-22 : Dynamique de L'étalement pour une épaisseur de la couche d'oxydation de 1.5 mm.

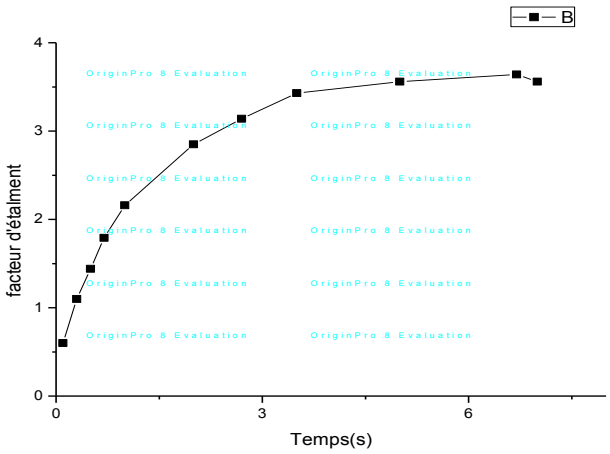


Figure IV– 23 : Facteur d'étalement Pour le cas d'une épaisseur de 1.5mm.

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

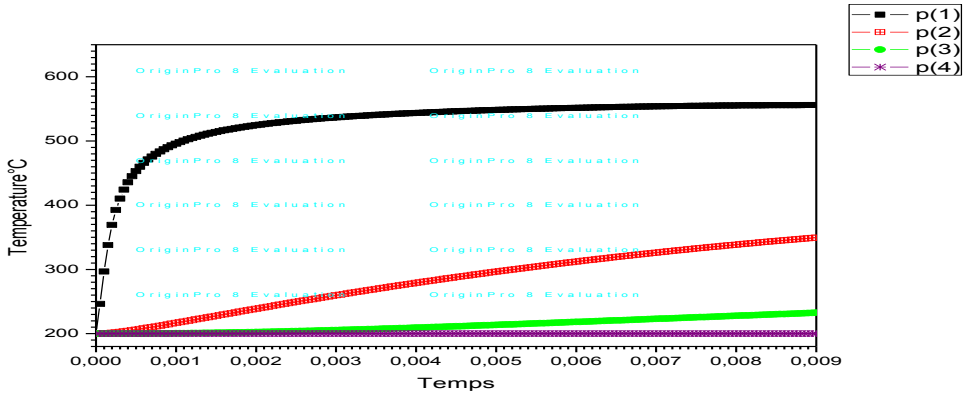


Figure IV-24 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans le substrat Pour le cas d'une épaisseur de 1.5 mm.

La figure IV-24 représente Le profil de température dans le substrat d'acier oxydé sur lequel est injectée une goutte d'aluminium, avec trois graphes chacune représente les températures des déférents points. On remarque que la couche d'oxydation de 0.5mm subie et absorbe toute la chaleur de la particule tandis que l'acier garde sa température initiale t=200 °C,

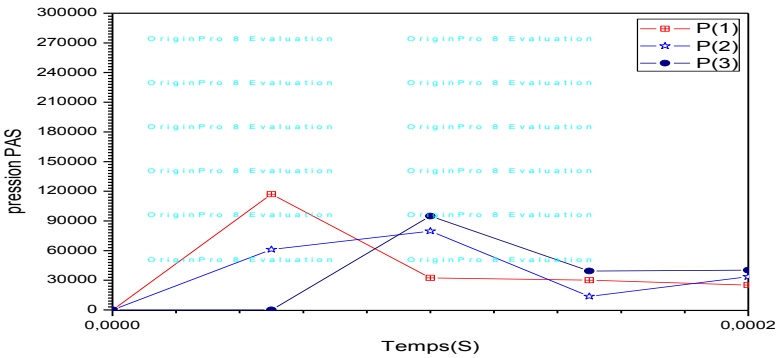


Figure IV-25: la variation de la pression au point d'impact Pour le cas d'une épaisseur de 1.5mm.

La figure IV-25: représente la variation de la pression d'impact sur le point de contact, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression jusqu'à (122kPas) beaucoup plus supérieure à la valeur nécessaire à l'accrochage mécanique.

IV.7. Comparaison des résultats :

IV.7.1. Comparaison des facteurs d'étalements pour chaque cas :

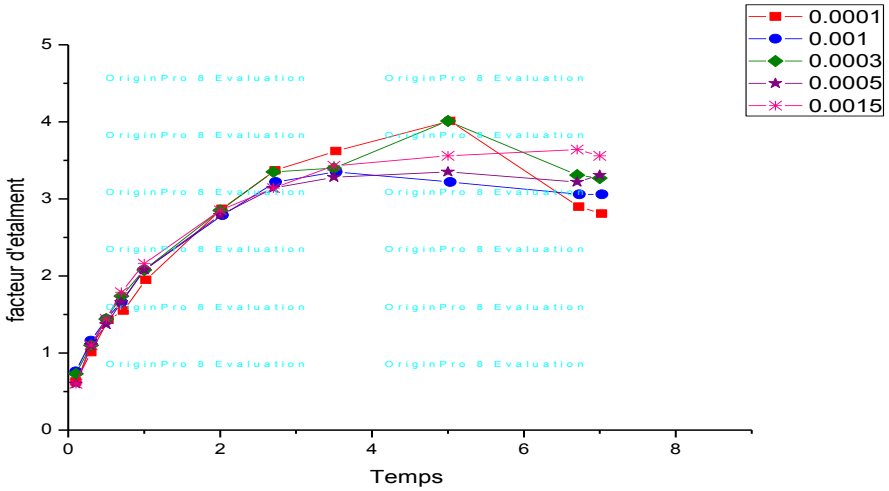


Figure IV-26:facteurs d'étalements des cinq cas étudié.

La figure IV-26 contient des courbes que chaque un d'entres eux représente l'évolution des facteurs d'étalement de nos cinq cas étudier (substrats oxydé avec variation d'épaisseurs e_1=0.1mm, e_2=0.3mm, e_3=0.5mm, e_4=1mm, e_5=1.5mm) ; on voit que pour :

Premier cas oxydation de e=0.1mm: le facteur d'étalement commence de 0.6 et atteint le 4.01 puis il rechute a 2.81 et puis il reste constant

Deuxième cas oxydation de e=0.3mm : le facteur d'étalement arrive jusqu'à 4.01 puis il rechute a 3.27 et reste constant

Troisième cas Oxydation de e=0.5mm : le facteur d'étalement arrive jusqu'à 3.35 puis il rechute a 3.22 et il commence a évolue

Quatrième cas oxydation de e=1mm : le facteur d'étalement arrive jusqu'à 3.35 puis il décent a 3.06 et reste constant

Cinquième cas Oxydation de e=1.5mm : le facteur d'étalement commence de 0.6et s'évolue pour arrivé jusqu'à 3.64 ensuit il rechute a 3.56 enfin il reste constant

Donc on remarque que l'épaisseur de l'oxydation influx d'une manière directe sur le facteur d'étalement tel que l'augmentation d'épaisseurs de la couche d'oxydation provoque la l'augmentation de facteur d'étalement comme le montre la figure IV-26

IV.7.2. Comparaison des températures a l'interface pour chaque cas :

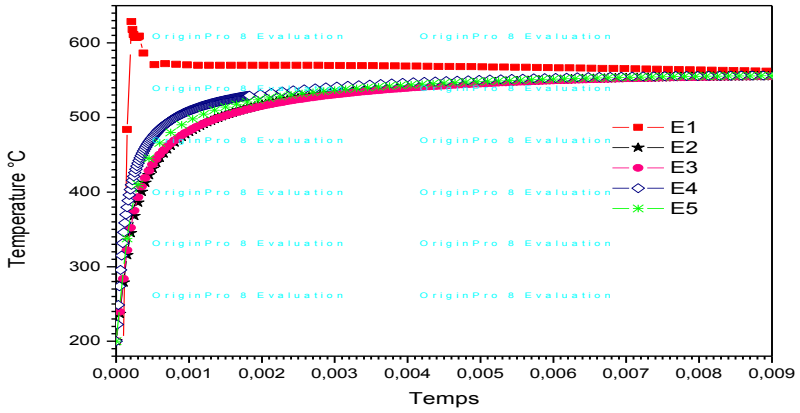


Figure IV-27:l'évolution des températures des cinq cas étudier.

La figure IV-27 représente l'évolution des températures au point d'impact pour chaque cas étudié, pour voir la différence entre eux et l'influence de la variation de l'épaisseur de couche d'oxyde sur l'évolution des températures

D'après les résultats des graphes on voie que le substrat avec oxydation a la courbe la plus élevé, et la température max est atteinte en présence des couche avec une épaisseur mince e=0.1mm pour les autre couches reste au milieu.

Donc on comprend que la présence et l'augmentation d'épaisseur de la couche d'oxydation influx sur l'évolution de température.

L'oxydation provoque diminution de température.

IV.7.3. Comparaison des pressions a l'interface pour chaque cas :

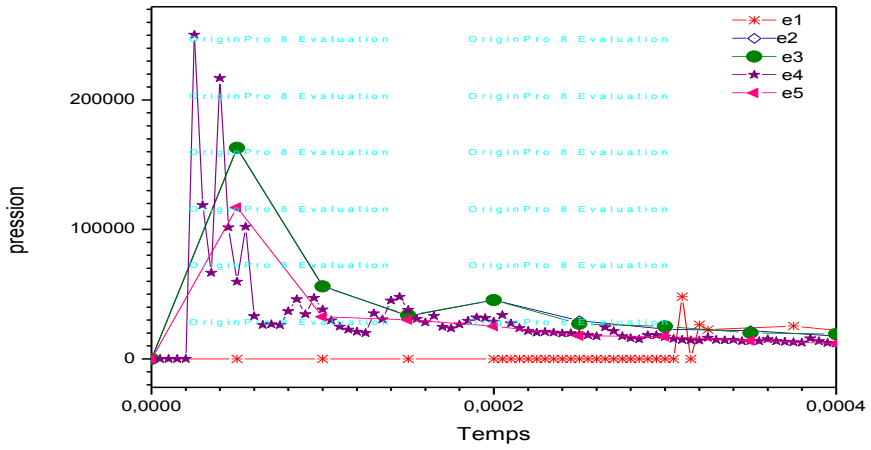


Figure IV-28:pression a l'interface des cinq cas.

La figure IV-28 représente les résultats numériques des profiles de pression dans le temps pour les cinq cas de l'épaisseur de la couche d'oxyde au point du contact d'une goutte au cours d'étalement, Nous remarquons initialement la pression est plus élevée au point d'impact, où la pression pendant les cinq cas(55 KPa , 161 KPa ,165KPa , 250KPa et 120 KPa respectivement) , cette augmentation conduit à une bonne adhérence goutte/substrat , et donc une diminution de la résistance thermique de contact , après un très court temps la pression est abaissé alors que la résistance thermique de contacte augmente, cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies.

IV . 8. Conclusion :

Les résultats issus du modèle numérique présentés dans le chapitre prédisent montre l'effet des différents paramètres mis en jeu sur le processus d'étalement et de la solidification des lamelles d'aluminium déposées sur des substrats métalliques (acier). L'ensemble de ces résultats permet de montré que l'épaisseur de couche d'oxyde infecte directement a l'étalement et la solidification, de goutte d'aluminium sur une surface de substrat d'acier représentant des aspérités la vitesse de solidification par l'augmentation de la résistance thermique d'une part dû à la faible conductivité de la couche et d'autre part par l'ajout d'une deuxième résistance frontale.

L'épaisseur de la lamelle, et l'état de surface du substrat en tenant compte de la couche d'oxyde qui se forme à la surface des substrats métalliques après polissage et préchauffage.

Il a été numériquement montré que la variation d'épaisseur de couche d'oxydation joue un rôle déterminant sur le transfert de chaleur dans le système lamelle-substrat.

Apres l'analyse de résultat de simulation ou peut conclure :

- La couche d'oxydation formée sur le substrat et sont épaisseur joue un rôle très important sur l'étalement de lamelle.
- L'épaisseur a un point critique (e=0.1mm) ou il n'influx plus sur la pression a l'interface de substrat.
- Dans le cas du substrat en acier, la couche d'oxyde altère le transfert thermique lamelle-substrat et entraîne une solidification plus lente des lamelles.
- La qualité de lamelle varie proportionnellement avec l'épaisseur de la couche d'oxyde s'il ne provoque pas l'éclaboussement de lamelle.

Conclusion générale

Ce travail s'intéresse à l'expérience numérique de la formation de lamelle, dans un procédé de revêtement et qui possède une grande importance dans l'industrie, parmi les matériaux utilisés dans ce procédé on cite l'aluminium, un matériau fortement utilisé dans les barrières thermiques, l'isolation électrique….

Expérimentalement en raison des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la microseconde et du micromètre.il est donc nécessaire de faire appel à des outils numériques complexes pour prendre en compte les divers aspects thermiques et dynamiques.

Dans 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 d'acier présentant des pics en présence de couche d'oxyde de différents épaisseurs.

- ✓ 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 et troisième chapitre, on a décrit les équations et les méthodes numériques qui expliquent le phénomène physique de l'étalement avec solidification des particules sur substrat.
- ✓ Dans le dernier chapitre, on a fait la simulation en 2D cartésien sur un cas de validation afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, puis sur l'impact de particule d'aluminium sur substrat d'acier en présence de couche d'oxyde, les résultats obtenues montrent que les deux paramètres jouent un rôle important sur la morphologie finale du lamelle, la projection de particule (goutte) sur un substrat est une technique largement utilisée dans l'industrie .

Les résultats numériques ont montré que la variation de l'épaisseur de couche d'oxyde joue un rôle très important sur la formation de lamelle.

- ➢ La couche d'oxydation formée sur le substrat et sont épaisseur joue un rôle très important sur l'étalement de lamelle.
- ➢ L'épaisseur a un point critique (e=0.1mm) ou il n'influx plus sur la pression a l'interface de substrat.
- ➢ Dans le cas du substrat en acier, la couche d'oxyde altère le transfert thermique lamelle-substrat et entraîne une solidification plus lente des lamelles.

- La qualité de lamelle varie proportionnellement avec l'épaisseur de la couche d'oxyde s'il ne provoque pas l'éclaboussement de lamelle.

Tous les calculs et les modélisations mathématique de cette étude sont réalisé par le logicielle ANSYS

Références Bibliographiques

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

[2]: P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussous, Quovadis thermal spraying, J. Thermal spray technology 10(1) (2005) 44-66

[3]:J. Cedelle, M. Vardelle, P. Fauchais, « Influence of stainless steel substrate preheating on surface topography and on millimeter and micrometer sized splat formation », Surface and coating technology 201 (2006) 1373-1382

[4]: Mémoire magister, DJEGHDJOUGH Mohamed « Effet de la température de préchauffage du substrat sur l'adhérence des revêtements déposés par torche à flamme », Blida, Juin 2010.

[5] : Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master, « baham » , Médea 2015 .

[6]: 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.

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

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

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

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

[11] : http://www.metrasur.com/traitement-de-surface-hvof.html

[12] : S. Audisio, M. CAILLET,A. GALERIE et H. MAZILLE, « Revêtements et Traitements de Surface », (éd.) Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1998.

[13] : S. Beauvais, « Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma », Thèse de Doctorat (8 juillet 2003), Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

[14] : Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master,Dahmani Mohammed, Zitouni Boumedienne « L'étude de l'effet de la présence des pics et des creux surfacique de substrat sur le processus de l'étalement de particule lors de formation de dépôt d'aluminium » 2015.

[15] : Fauchais P., Grimaud A., Vardelle A., Vardelle M., "La projection plasma revue", Ann. Phys. Fr., Vol.14, pp. 261-310, (1989).

[16]:C. BAUDRY. Thèse doctorat : « Contribution à la modélisation instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma », Université de Limoges, 2003

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

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

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

[20]: J. Stokes; « The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process» The Theory and Application of the SULZER METCO Diamond Jet HVOF Thermal Spray Process.

[21] S. A. Wutzke, E. Pfender, E. R. G. Eckert, Study of electric arc behaviour with superimposed flow, IAAA Journal, 5 (4), p 707-713-, (1967).

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

[23]: 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.

[24]: 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, OHUSA, 1982, pp361.

[25]: 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

[26] : 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.

[27] : Projet fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master, benchaouane hadjira, hamma samira, « ETUDE NEMURIQUE DE L'INFLUENCE DE PRESENCE DES PICS SURFASIQUE DE SUBSTRAT D'ACIER SUR L'INTERACTION THERMIQUE ET DYNAMIQUE DE L'IMPACT » ,2015.

[28]: Site Internet de Gordon England: www.gordonengland.co.UK

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

[30] 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

[31]: 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.

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

[33]: 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

[34]: 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.

[35]: 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.

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

[37]: S. Chandra, P. Fauchai Formation of solid splats during thermal spray deposition. Journal of Thermal Spray Technology, 18 (2), 2009, pp. 148-180.

[38]: R.A. Neiser, M.F. Smith, and R.C. Dykhuizen «Oxidation in Wire HVOFSprayed Steel» Journal of Thermal Spray Technology Volume 7(4)
December 1998.

[39]: S. Deshpande, T, S.Sampath, H. Zhang,« Mechanisms of oxidation and its role in micro structural evolution of metallic thermal spray coatings—Case study for Ni–Al», Surface & Coatings Technology 200 (2006) pp 5395-5406.

[40]: K. Dobler, H. Kreye, and R. Schwetzke, «Oxidation of Stainless Steel in the High Velocity Oxy-Fuel Process» Journal of Thermal Spray Technology Volume 9 (3) September 2000.

[41]: J.G. Legoux, E. Irissou, and C. Moreau «Effect of Substrate Temperature on the Formation Mechanism of Cold-Sprayed Aluminum, Zinc and Tin Coatings» Journal of Thermal Spray Technology 2007.

[42]: L. Bianchi, A.C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, « Splat formation and cooling of plasma-sprayed zirconia»; Thin Solid Films 305 (1997) pp 35-47.

[43] : S. Valette «Influence de la préoxydation d'un acier sur l'adhérence de son revêtement en alumine déposé par voie plasma thermique» Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, N° 50-2004.

[44]: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

[45] :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.

[46]: 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.

[47]: A. Vardelle, P. Fauchais, N.J. Themelis, and Oxidations 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.

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

[49] : 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).

[50]: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.

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

[52]: 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.

[53]: 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.

[54]: 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.

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

[56]: 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.

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

[58]: 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.

[59]: 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.

[60]: 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.

[61]: 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-

[62]: 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.

[63]: 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.

[64]: 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.

[65]: 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

[66]: 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),pp 1033-1038.

[67]: S. Simard, B. Arsenault, And 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.

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

[69] APPROCHE BIPHASIQUE DU CHANGEMENT DE PHASE AVEC INTERACTION LIQUIDE -S OLIDERodolphe LANRIVAIN, Luisa SILVA, Thierry COUPEZ, Résumé pour le 1ercolloque du GDR interactions fluide-structure - 26-27 sept. 2005

[70]:P. Diez et R. W. Smith (1993)"The Influence of Powder Agglomeration Methods on Plasma Sprayed Yttria Coatings", Journal of Thermal Spray Technology, 2, (2), pp.165-178.

[71]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.