REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Énergétiques

L'influence du champ magnétique sur la formation des lamelles lors de l'impact des particules sur un substrat oxydé en présence des aspérités.

Présenté par :

- DOUKANI MOHAMED EL AMINE
- AZIZI HICHEM

Proposé et Dirigé par :

Dr : ZIRARI MOUNIR

Promotion 2019

REMERCIMENTS

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guidés vers le droit chemin, de nous avoir aidées

Tout au long de nous années d'étude

Nous adressons notre profond remerciement à notre profond remerciement à notre encadreur Monsieur : ZIRARI MONIRE, que nous aide tout au long de ce travail.

Nous remercions aussi, les nombres de jury d'avoir accepté notre travail.

Ainsi nous adressons nous remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin par le fruit de leur connaissance pendant toute la durée de notre parcours éducatif.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon cher ***Père*** *et ma chère* ***Mère*** *pour l'éducation et le grand*

amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.
A mes chers frères.
A mes chères soeurs.
A toute ma famille DOUKANI.
A tous mes profs qui nous a appris.

A mes chers amis ,
A toutes la promo Master génie mécanique 2018/2019.
A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon cher ***Père*** *et ma chère* ***Mère*** *pour l'éducation et le grand*

amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.
A mes chers frères.
A mes chères soeurs.
A toute ma famille AZIZI.
A tous mes profs qui nous a appris.

A mes chers amis ,
A toutes la promo Master génie mécanique 2018/2019.
A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Résume :

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux, relatifs principalement à la nature du matériau à projeter, la source de chaleur, l'atmosphère environnante, le substrat. Les interactions entre phases solides et liquides et entre gouttes qui s'écrasent simultanément sur la surface solide l'une à cote de l'autre posent question, parce qu'elles modifient la morphologie d'impact. Afin de mieux comprendre le phénomène d'impact en présence de champ magnétique. On à réaliser des expériences numérique basé sur la méthode EF/VOF pour l'étude de la formation d'une lamelle en Nickel sur un substrat rugueux en acier, avec l'analyse de l'effet de l'impact de particule, ainsi que l'étude de l'influence de champ magnétique sur la formation des lamelles. Où on à trouver que le champ magnétique influence considérablement la formation de lamelle.

Mot clés :

Simulation numérique, VOF, éléments finis, impact, successive, simultané, topographie, oxydation.

الملخص

تعتمد مورفولوجيا وخصائص الرواسب على العديد من المقادير التجريبية ، تتعلق بشكل رئيسي بطبيعة المواد التي سيتم رشها ، ومصدر الحرارة ، والغلاف الجوي المحيط ، والركيزة. إن التفاعلات بين المراحل الصلبة والسائلة وبين القطرات التي تسقط في وقت واحد على السطح الصلب بجانب بعضها البعض تطرح سؤالا ، لأنها تعدل مورفولوجيا التأثير. لفهم لدراسة EF / VOF أفضل لظاهرة التأثير في وجود المجال المغناطيسي. تُستخدم التجارب الرقمية المستندة إلى طريقة تشكيل طبقة النيكل على الركيزة الفولاذية الخام ، مع تحليل تأثير تأثير الجسيمات ، وكذلك دراسة تأثير المجال المغناطيسي على تكوين الطبقة. حيث نجد أن المجال المغناطيسي يؤثر بشكل كبير على تكوين الصفيحة

الكلمات المفتاحية

المحاكاة العددية,VOF,العناصر المحدودة ، التأثير ، متتالية ، متزامنة ، طبوغرافية ، أكسدة

Summary:

The morphology and properties of deposits depend on many experimental parameters, mainly related to the nature of the material to be sprayed, the heat source, the surrounding atmosphere, the substrate. The interactions between solid and liquid phases and between drops that collapse simultaneously on the solid surface next to each other pose a question, because they modify the morphology of impact. To better understand the phenomenon of impact in the presence of magnetic field. Digital experiments based on the EF / VOF method are used to study the formation of a nickel lamella on a rough steel substrate, with the analysis of the effect of the particle impact, as well as the study of magnetic field influence on lamella formation. Where we find that the magnetic field considerably influences lamella formation.

Keywords:

Simulation numerical , VOF, finite elements, impact, successive, simultaneous, topography, oxidation.

LISTE DE FIGURES

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

Figure I -2 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [7]…….6

Figure I -3 *:* Schéma de principe d'un pistolet flamme [8]…….7

Figure I-4: Schéma d'un pistolet flamme fil [9]……..……...…….7

Figure. I-5 : schéma du procédé HVOF……..9

Figure I-6 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation. [14]…….……...10

Figure I-7 : schéma du procédé arc fil……..…….11

.

Figure I-8 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé…….……..…..11

Figure I-9 : Principe de fonctionnement de projection plasma……...……...12

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

Figure I-11 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma…….…….…….…13

Figure I-12 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [1,18]……....13

Figure I-13 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes [19]……..…….…….…14

Figure I-14 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [19]……..…..…....15

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

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……...…….……17

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

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

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

Figure I-21 : Effet des techniques de projection sur le contenu des oxydes et porosité……...23

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……..24

Figure I-23: Couche de FeO obtenue sous atmosphère de CO2 à 1000 °C pendant 45 min [4]……..24

LISTE DE FIGURES

Figure I–24 : Epaisseur de la couche d'oxyde à la surface des substrats préchauffés dans différentes conditions……..…….25

Figure I-25: Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette [45]……..……...26

Figure I-26a : écrasement de particules sur des aspérités…….….27

Figure I-26b : processus du dépôt……..……27

Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon [82]……..…34

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

Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface…….……..…40

Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de front…….…….41

Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [96,97]…….……..……42

Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [98]……...…43

.

Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique [99]……44

Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps [86].....45

Figure III.1 : Méthode de discrétisations……..……49

Figure III.2 **:** Organigramme d'un logiciel éléments finis [87]……53

Figure III.3 : (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique…….…….55

Figure III.4 : Approche de ligne de courant d'Upwind [105]……...……58

Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS……65

Figure IV-2: configuration géométrique et conditions d'étalement pour l'identification……..…68

Figure IV-4: comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions…….….70

Figure IV-5: Schéma représentant le contact lamelle/substrat après l'oxydation de la Surface.....70

Figure IV-6 : Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation…….……71

LISTE DE FIGURES

Figure IV-7 *:* Représentation d'une surface au profil sinusoïdal idéal. Pour des faibles amplitudes, le liquide suit le profil de la surface ; mais pour des amplitudes plus élevées, des poches d'air se forment sous le liquide……..…….……..72

Figure IV-8 : Représentation de Rz sur un profil de surface……..……...72

Figure IV-9 ***:*** configuration géométrique de l'impact de gouttelette de nickel de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C avec une vitesse de 2.5m/s……..…….….73

Figure IV-10 : l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement des gouttes……..…74

Figure IV-11 : Position des points de température…….....……74

Figure IV-12 : Profils de température en fonction de temps pour cinq position au long de substrat Verticalement…….……...…74

Figure IV-13: l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte…….….76

Figure IV-14:la variation dans le temps de la pression d'impact à l'interface Particule/ substrat……...…….……76

Figure IV-15 : Facteur d'étalement de la chute de nickel de3, 92 mm de diamètre avec une vitesse d'impact de 2,5 m /s sur un substrat oxydé……77

Figure IV-16: Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation…..…….……80

.

Figure IV-17: profiles de température en fonction de temps pour cinq positions Au long de substrats verticalement pour le cas B…….…….....81

Figure IV-18: profils de pression en fonction de temps pour six positions dans le substrat pour le cas B…….…….…….81

Figure IV-19 : Facteur d'étalement de la chute de nickel de3,92 mm de diamètre avec une vitesse d'impact de 2,5 m /s sur un substrat oxydé ……..……82

Figure IV-20: Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation…….……84

Figure IV-21: profiles de température en fonction de temps pour cinq positions Au long de substrat verticalement pour le cas C……..……85

Figure IV-22: la variation dans le temps de la pression d'impact à l'interface Particule/ substrat cas 3…….…….…….87

Figure IV-23: Facteur d'impact pour le 3ème cas…….……88

Figure IV-24 : Comparaison entre les facteurs d'étalement pour les trois cas……..……...89

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau III.1 : Tableau de Représentation d'équation de transport. [105]…….….54
- Tableau IV- M 1 : Les prospérités des mâtereaux utilisés……..67
- Tableau IV- M 2: impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 2.5m/s et une température de1247°C sur un substrat en acier initialement……69
- Tableau IV- M 3: l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte....75
- Tableau IV-M 4: distribution de la température lors de l'impact d'une particule de nickel
  initialement avec une vitesse de 2.5m/s et une température de 1247℃ sur un substrat initialement 200℃……...……78
- Tableau IV-M 5 *:* l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte…80
- Tableau IV-M 6: les résultats de l'étalement de goutte de la deuxième expérience…...83
- Tableau IV-M 7: les résultats de l'étalement de goutte de la troisième expérience…....86
- Tableau IV-M 8:Montre L'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte……...…88

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
Cp	chaleur spécifique	$[J.Kg^{-1}.K^{-1}]$
p	pression	[Pa]
T	Température	[K]
T	variable du temps	[s]
xx, yy, zz	contraintes visqueuses normales	$[N.m^{-2}]$
yz, xy, zx	contraintes visqueuses tangentielles	$[N.m^{-2}]$
u	vitesse suivant x	$[m.s^{-1}]$
v	vitesse suivant y	$[m.s^{-1}]$
w	vitesse suivant z	$[m.s^{-1}]$
x, y, z	coordonnées cartésiennes	
ρ	masse volumique	$[Kg.m^{-3}]$
ρ_0	masse volumique de référence	$[Kg.m-^{3}]$
μ	viscosité dynamique	$[Kg. m^{-1}.s^{-1}]$
dQ	Énergie élémentaire	[J]
λ	Conductivité thermique du matériau	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
A	section	$[m^2]$
dt	temps élémentaire	[s]

Nomenclature

$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température en x	[K.m^{-1}]
σ	constante de Stephan Boltzmann	[W.m^{-2}.K^{-4}]
A	surface d'échange	[m^2]
ε	coefficient d'émission de la surface	
Ts	température de surface du corps	[K]
Ta	température ambiante.	[K]
$\emptyset$	La dissipation irréversible due au frottement visqueux	
φ	La densité de flux thermique	[w/m^2]
ν	La viscosité cinématique	[m^2/s^2]
h	La constante de Plank	[Js^{-1}]
E	Energie	[J]
B	Champ d'induction magnétique	[T]
J	Champ de densité de courant électrique	[A m^{-2}]

Abréviation

2D	Deux Dimensions
EDP	Equations aux Dérivées Partielles
EF	Elément Finis
VF	Volume Finis
MDF	Méthode des Différences Finis
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluide)
MAC	Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)
TVD	Total Variation Diminishing

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME……..……I

LISTE DES FIGURES……II

LISTE DES TABLEAUX…….……..…..III

NOMENCLATURE…….……..IV

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction ……..……..…4

I.1 La projection thermique…….…..…….……4

I.2 .Technique de projection thermique……..…….……5

I.2.1 .Projection par la flamme …….……..6

I.2.1.1 La projection flamme –poudre ……....…….6

I.2.1.2.La projection flamme-fil ……..…….…….7

I.2.1.3. La projection flamme de cordons flexibles…….…….…8

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 [14]……....10

I.2.2.2. La projection par plasma d'arc soufflé ……..……..11

I.2.3 La projection plasma ……....…….…….11

I.2.3.1. Principe ……..…..……..…12

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

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

SOMMAIRE

I.2.3.2.2.Le gaz plasmagène ……..…….……..…14

I.2.3.2. 3. Injection des gaz …….…….……...……16

I.2.3.4. Ecoulement du jet plasma ……...……16

I.4. Traitement des particules dans le jet plasma ……..……...…17

I.4.1 Injection de la poudre …….……..……17

I.5. Substrat ……..……18

I.5.1. Préparation de substrat ……..……..…18

I.5.2. Construction du dépôt…….……..19

I.5. 3. Ecrasement des particules sur le substrat ……..……..…20

I.6. L'impact ……..…20

I.6.1. Etalement de la particule ……..……...……..…20

I.6.2. La solidification des lamelles …….……22

I.7. Phénomènes d'oxydation …….…….…22

I.7.1. Oxydation des substrats ……...23

I.7. 2.Epaisseur de la couche ……..……..25

I.7.3. Oxydation des gouttelettes en vol …….25

I.8. Oxydation lors de la formation du dépôt ……..……....26

I.8.1. Caractéristiques du dépôt ……..……..……....26

I.8.2. Microstructure …….……..…28

I.8.3. Teneur en oxydes et porosité ……..…28

I.8.4. Adhérence et dureté ……..……..……..…28

I.8.5. Resistance à la corrosion ……..……..…….…29

I.8.6 Définition du champ magnétique ……..……..…30

I.8.7.Matériau ferromagnétique doux ……..……..…….……...30

I.8.8 Applications …….…….....31

I.8.9 Matériaux et caractéristiques……..…….…… 31

I.9.L'état de l'art…….…….…….……31

Conclusion ……...……..32

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

Introduction ……..…….…….....…34

II.1.Modèle dynamique ……..……..……..…34

II.2. Modélisation de l'écoulement des fluides 35

II.2.1. L'équation de la continuité ……...……35

II.2.2 .L'équation de quantité de mouvement …….…….…..…35

II.2.3. Équation de l'énergie …….……36

II.3. Modèle thermique …….…….…..……36

II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase …….……...…36

II.3.1.1. Méthode à grille mobile …….……...…37

II.3.1.2. Méthode à grille fixe …….……..37

II.3.1.3.a. Méthode d'enthalpie ……38

II.3.1.4.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente ……...…..……...39

II.4. Modèle thermique utilisé ……..……39

II.5.Calcul d'interfaces ……...……..40

II.5.1. Les méthodes de suivi de front …….……....41

II.5.2. Les méthodes de suivi de volume 42

II.5.3. La Méthode VOF CIAM ……...…...43

Conclusion……46

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

Introduction …….……48

III.1. Discrétisation des EDP …….…...…..……48

III.1.1. les trois grandes familles de méthodes…….…..…...…..48

III.1.1.1. Méthode des différences finies ……...……49

III.1.1.2.Méthode des volumes finis ……..…..……50

III.1.1.2.1.Méthode Volume de Fluide VOF (Volume Of Fluide) ……..…50

III.1.1.3.Méthode des éléments finis …….……..…51

III.1.1.3.1. Démarche éléments finis …….……..……51

III.1.1.3.2.Organigramme d'un logiciel élément finis …….……52

III.1.1.3.3. Présentation de la méthode …….....……..…53

III.2. Forme générale des équations du système [88] …….…….……53

III.3.choix d'un maillage …….…54

III.3 .1.Discrétisation …….……55

III.3.1.1.Terme temporelle …….……....56

III.3.1.2. Terme d'advection …….……...57

III.3.1.3. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)……....…....……57

III.3.1.4. Method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)……....….....….59

III.3.1.5. Approche Colloquée De Galerkin (COLG) ……..……..……60

III.3.2.Terme de Diffusion ……..……..….60

Conclusion…….....…61

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction…….…...63

IV.2 ANSYS……..….63

IV -3.Matériaux utilisés ……66

IV.3.1 le nickel ……..…66

IV.3.2.Le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation …….……..……..67

IV-4.Identification ……...…68

IV.4.1.impact d'une particule de nickel totalement fondue ……....69

SOMMAIRE

IV-5.Configuration et conditions d'étalement avec une couche d'oxydation ……...…71

IV-6.Rugosité du substrat …….…….72

IV-7.Premier cas …….…….…….…...…..73

IV-7.1.Conclusion partielle …….…….…….…79

IV-7.2 Deuxième cas …….…….....….79

IV-7.2.1 Etude de l'effet de champ magnétique sur la formation des lamelles….....79

IV-7.2.2.étude de Forme 1 ……..…….…80

IV-8.troisième cas…….…..84

IV-8.1.étude de Forme 2 …….……..…….…….84

IV.9. Comparaison des facteurs d'étalements pour chaque cas …….……....89

Conclusion……..…….….89

CONCLUSION GENERAL…….92

REFERENCES…….…....93

Introduction générale

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

La projection thermique est un procédé dans lequel les matériaux solides sont chauffés chimiquement (combustion) ou électriquement par des arcs électrique ou par des jets de gaz chauffées par des arcs, ensuite accélères par les jets de gaz créant des aérosols fondus se déplaçant à des grandes vitesses.

Ces aérosols sont diriges sur la surface cible ou les particules fondus individuelles viennent s'écraser, se refroidissent et se solidifient pour former un revêtement protecteur. La réalisation de revêtement par pulvérisation de fines gouttelettes sur la surface à recouvrir est un sujet à de plus en plus de recherches.

Afin de comprendre la morphologie de l'impact de la goutte sur le substrat il est intéressent d'examiner les phénomènes dynamiques et thermiques à l'échelle de ces gouttes qui vont créer la fine couche.

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

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact dynamique couple avec la solidification (thermique) des gouttelettes d'un alliage de nickel de 3,92 mm de diamètre impact avec une vitesse initiale de 2.5m/s sur un substrat en présence de couche d'oxyde.

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 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 de nickel qui s'écrasent sur le substrat d'acier rugueux, ainsi que l'étude de l'influence de champ magnétique sur la formation des lamelles.

Notre travail se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE 01 :

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

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

I.1 La projection thermique :

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 de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique.

La recherche de propriétés de surface spécifiques sur 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 Vélocité Oxygène 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.

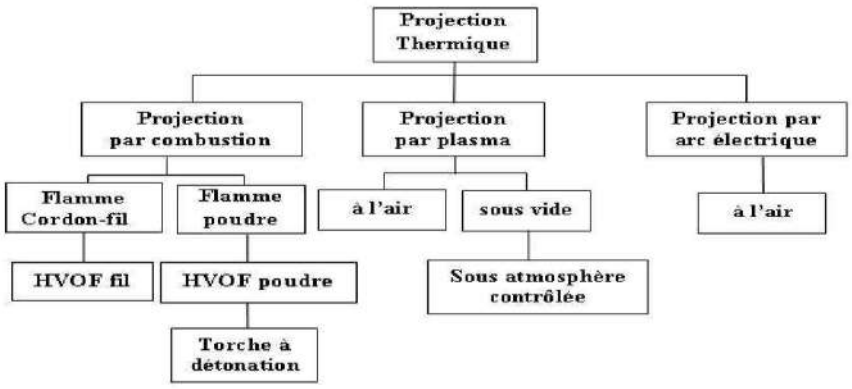


Figure I-1 : schéma de principe de la projection thermique [1].

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

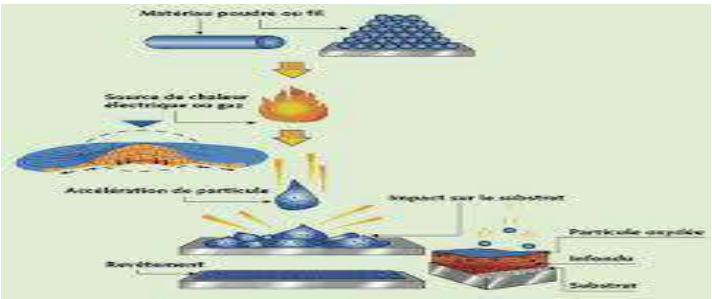


Figure I -2 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [3].

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 [3].

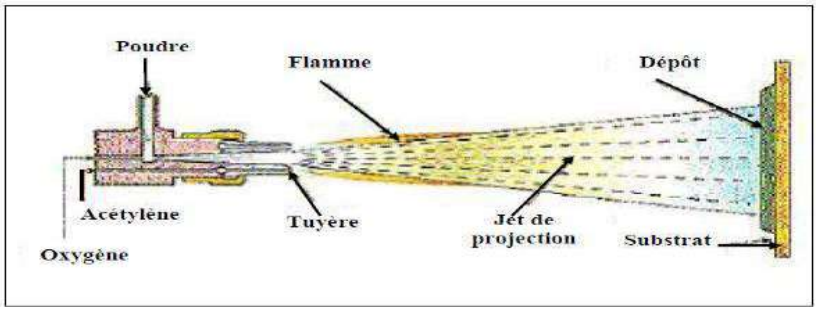


Figure I -3 *:* Schéma de principe d'un pistolet flamme [4]

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. [4-5] 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 (Al_2O_3, Al_2O_3-TiO_2, ZrO_2 avec stabilisants).

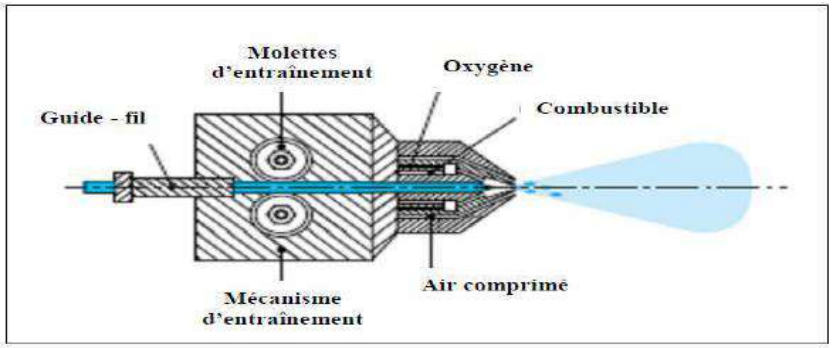


Figure I-4: Schéma d'un pistolet flamme fil [5].

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) [6]. 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 [7].

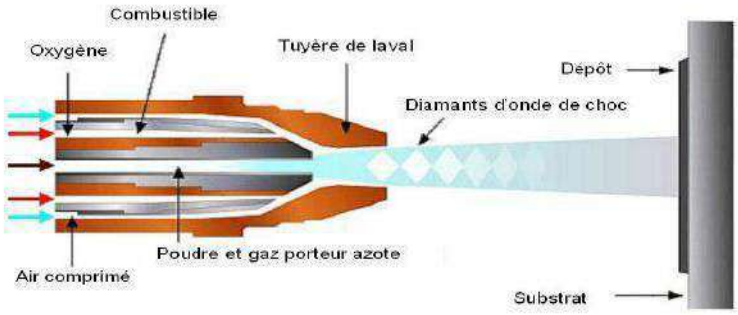


Figure. I-5 : schéma du procédé HVOF [7].

- **Le procédé HVAF :** High Vélocité air –fuel flamme, la combustion est assurée par un mélange kérosène –air comprimé [6].

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 [8,9].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 [9]. 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 [8].

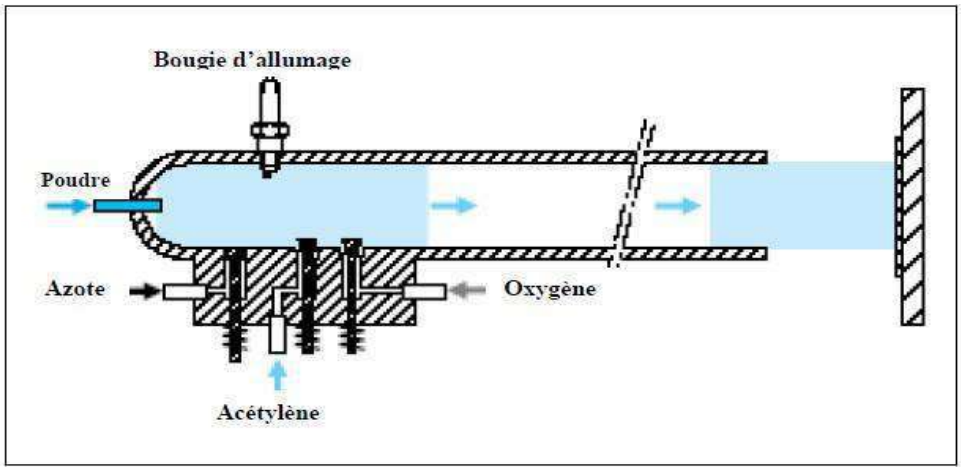


Figure I-6 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation. [10]

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 [10]:

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.

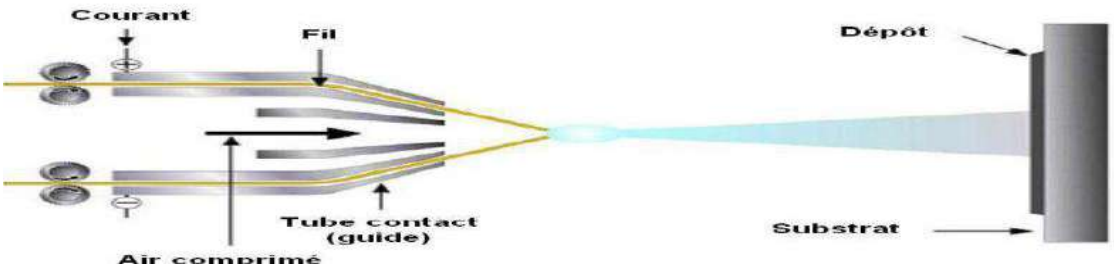


Figure I-7 : schéma du procédé arc fil

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.

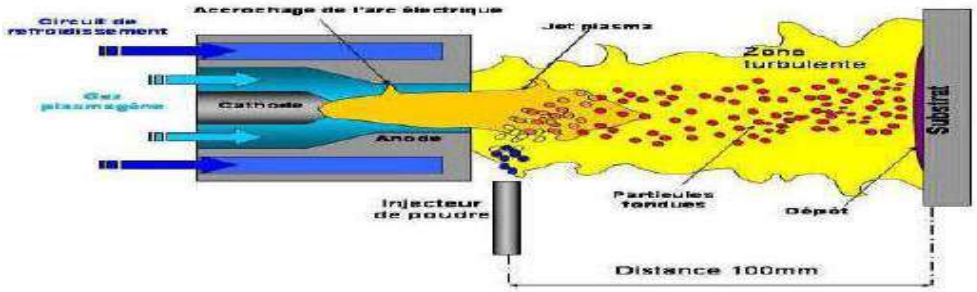


Figure I-8 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.

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 [11].

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[12]. 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.

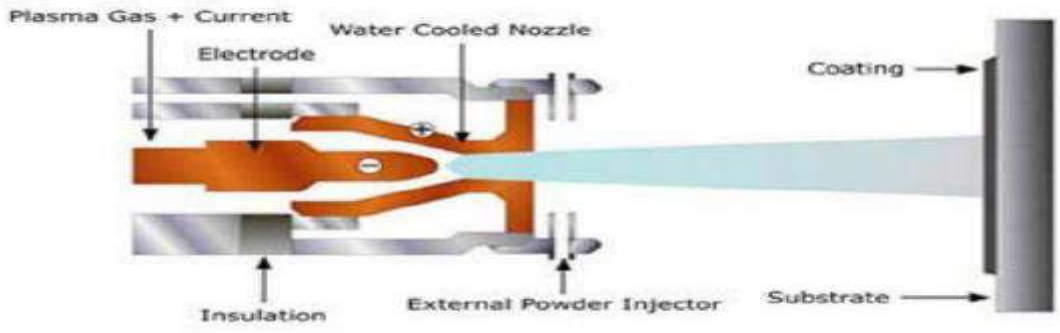


Figure I-9 : Principe de fonctionnement de projection plasma [12].

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.

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

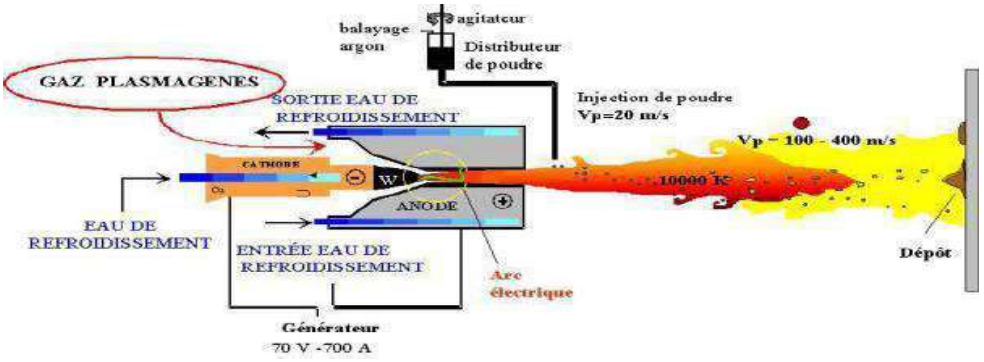


Figure I-10: Torche plasma à arc transféré [12].

- **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 (10) ou cœur du jet [12].

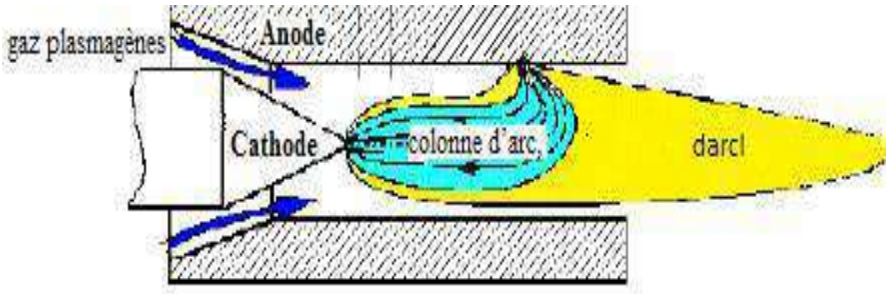


Figure I-11 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma [12].

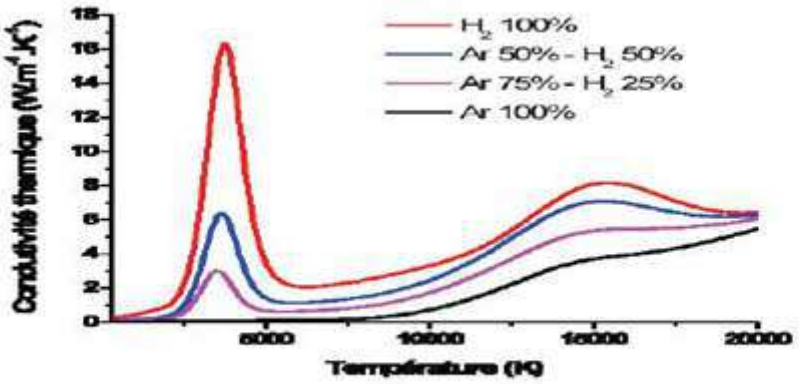


Figure I-12 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [5,13]

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 [11]. 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 $_0{}^1$.

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 [15].

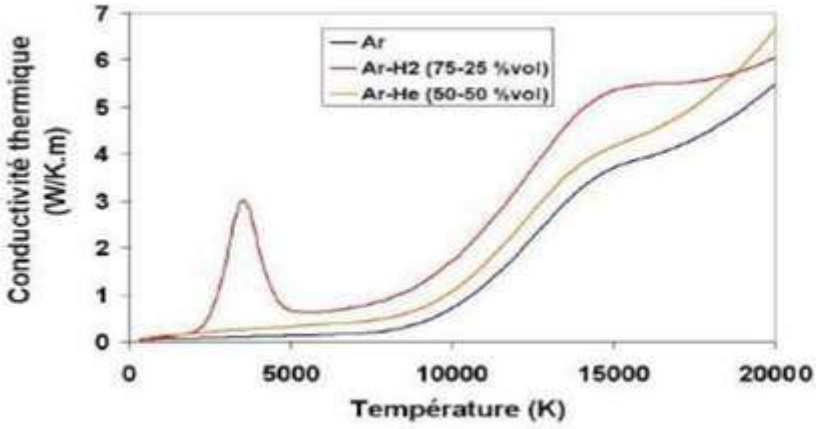


Figure I-13 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes [15].

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.

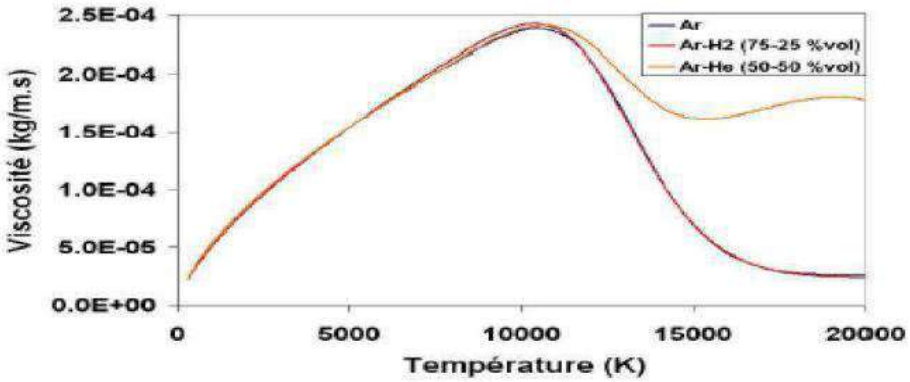


Figure I-14 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [15].

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

$$\frac{\overline{\mathrm{P-Qeau}}}{\dot{m}}(kg)$$

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.

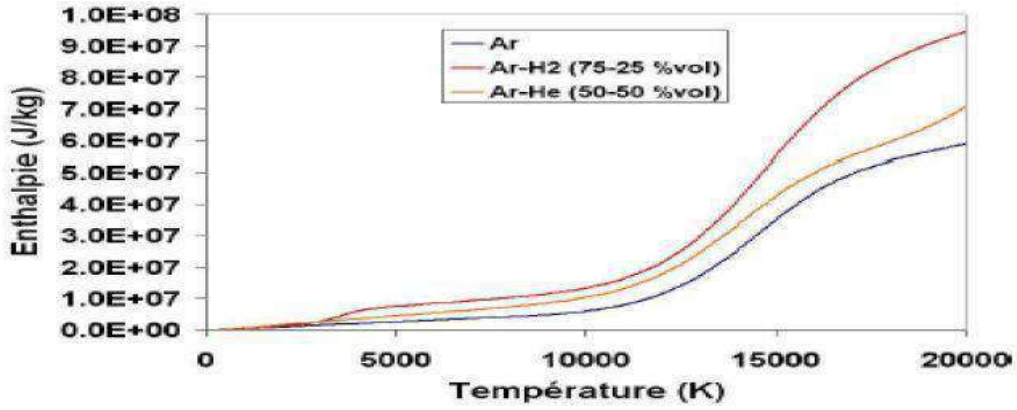


Figure I-15: Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [15].

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 » [8,16] qui

- un mélange gazeux de faible densité : 1/30 à 1/40 de la densité du mélange gazeux froid [17].

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 [18].

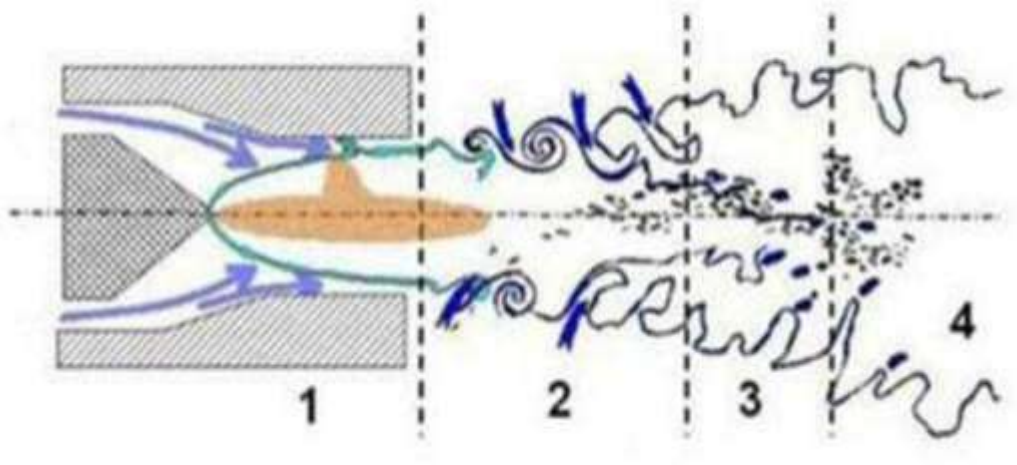


Figure I-17 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé**.**

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, …) [10].

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) :

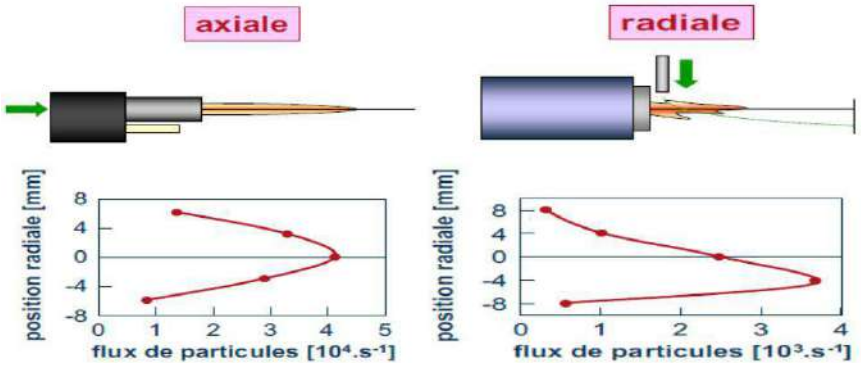


Figure I–18 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale).

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 [19,20].

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 [21, 22] :

*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 :[23]

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.

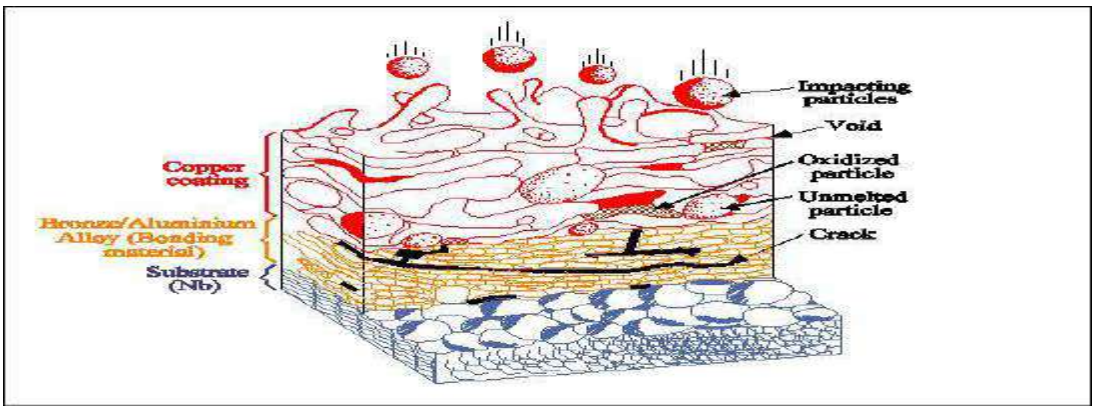


Figure I-19 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique **[24].**

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 **[25,26].**

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 **[27].** 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.

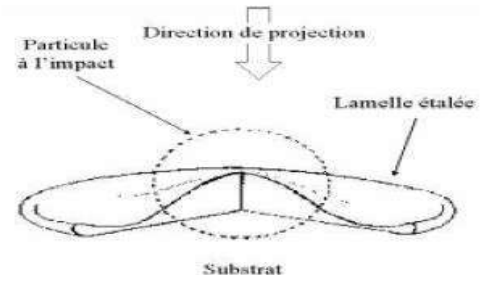


Figure I-20 : Schéma d'écrasement de la particule **[28]**.

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.…) **[28].**

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 **[29]**. 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 **[30]**. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué **[31]**. 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) **[32]** 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)

$$\varepsilon = \frac{D}{d}$$

A part ir 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) :

$$\varepsilon = 1{,}29.\ R_e^{0.2}$$

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) **[33].**

$$\varepsilon = A.R_e^{b}$$

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 [34]. 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 [35].

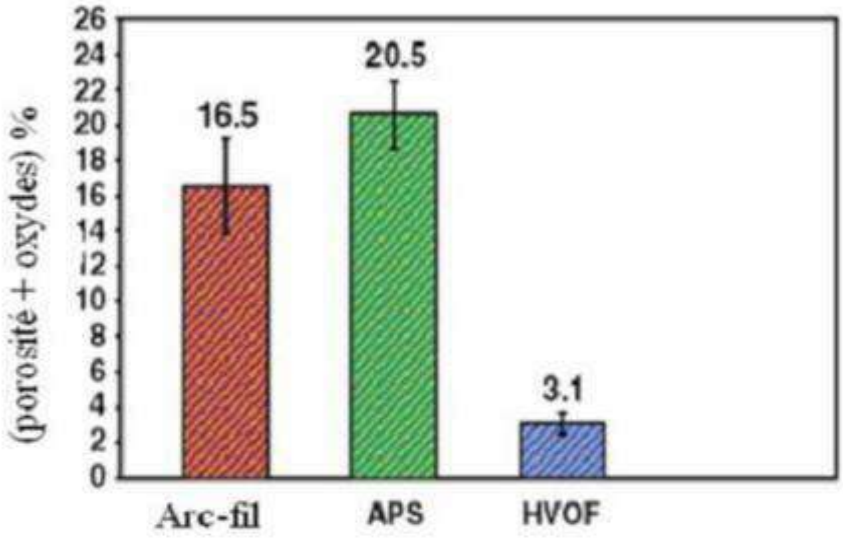


Figure I-21 : Effet des techniques de projection sur le contenu des oxydes et porosité.

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 [36].

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 [37].

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 [38].

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).

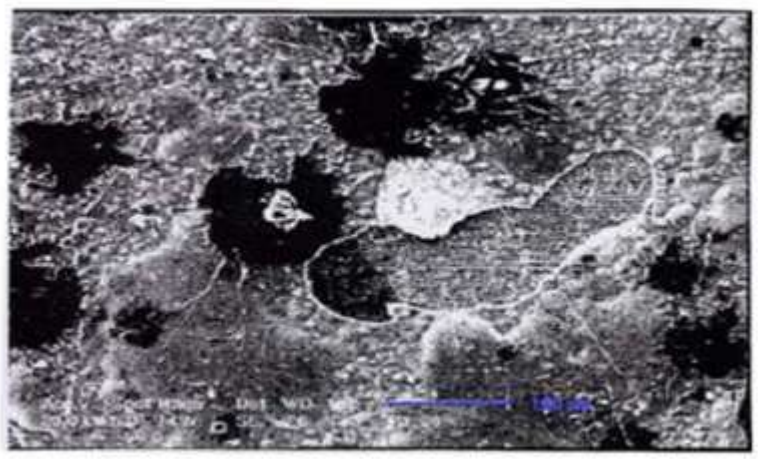


Figure I-22 : Lamelles d'alumine sur une couche d'oxyde Fe_2O_3 obtenue par peroxydation d'un substrat XC38 au four sous air avec rupture et délaminage de la couche d'oxyde.

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 [39].

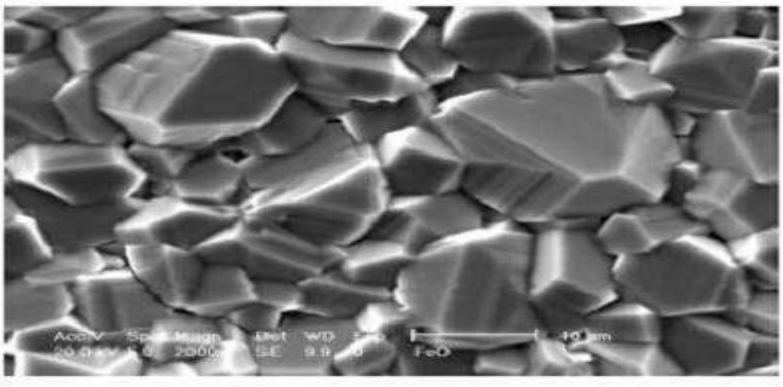


Figure I-23: Couche de FeO obtenue sous atmosphère de CO_2 à 1000 °C pendant 45 min.

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 à723 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.

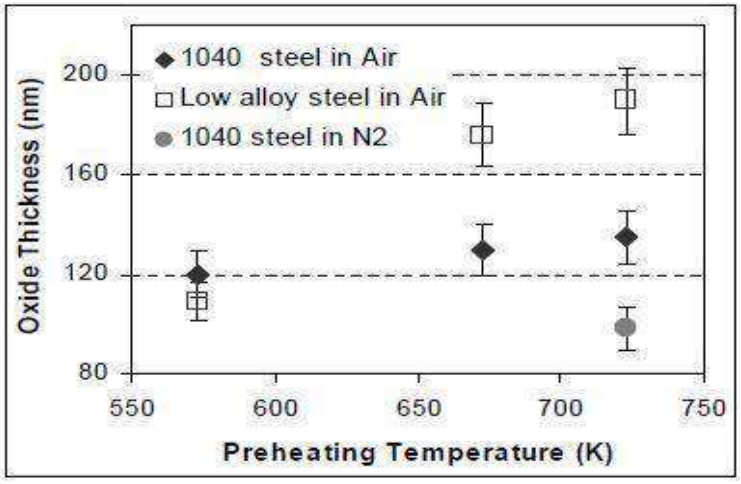


Figure I–24 : Epaisseur de la couche d'oxyde à la surface des substrats préchauffés dans différentes conditions.

I.7.3. Oxydation des gouttelettes en vol :

L'importance de l'oxydation des gouttelettes en vol dépend **[40,41]** :
de la nature du matériau projeté,

- de la température des gouttelettes,
- du temps de séjour des particules en vol, donc de leur vitesse et de la distance de tir,
- de la quantité d'oxygène présente au voisinage des gouttelettes,
- de la cinétique des réactions d'oxydatio
- 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 (gaz particule >50) et pour un nombre de Reynolds de la particule supérieur à 20.

Ce phénomène est donc favorisé par des vitesses de gaz d'atomisation élevées **[42, 43,44]**

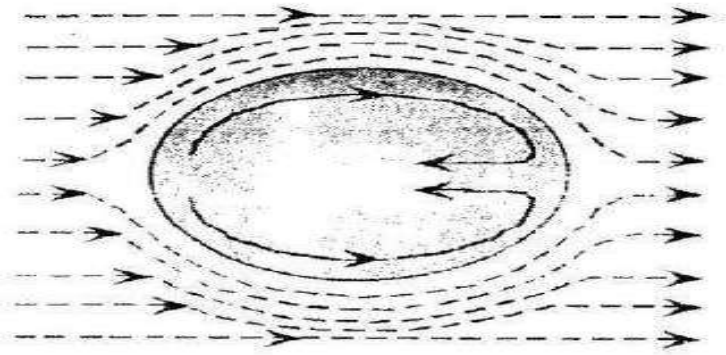


Figure I-25: Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette **[41].**

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

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

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

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 [45] :

- 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.

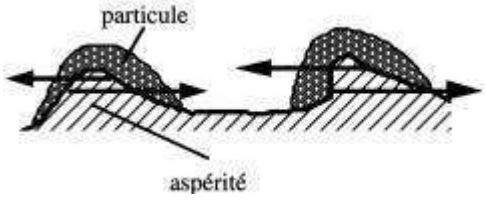


Figure I-26a : écrasement de particules sur des aspérités

.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 m) favorables aux propriétés mécaniques, mais provoque l'apparition de phase métastables, voir vitreuse, par exemple pour l'alumine, il y a l'apparition de la phase y [47]

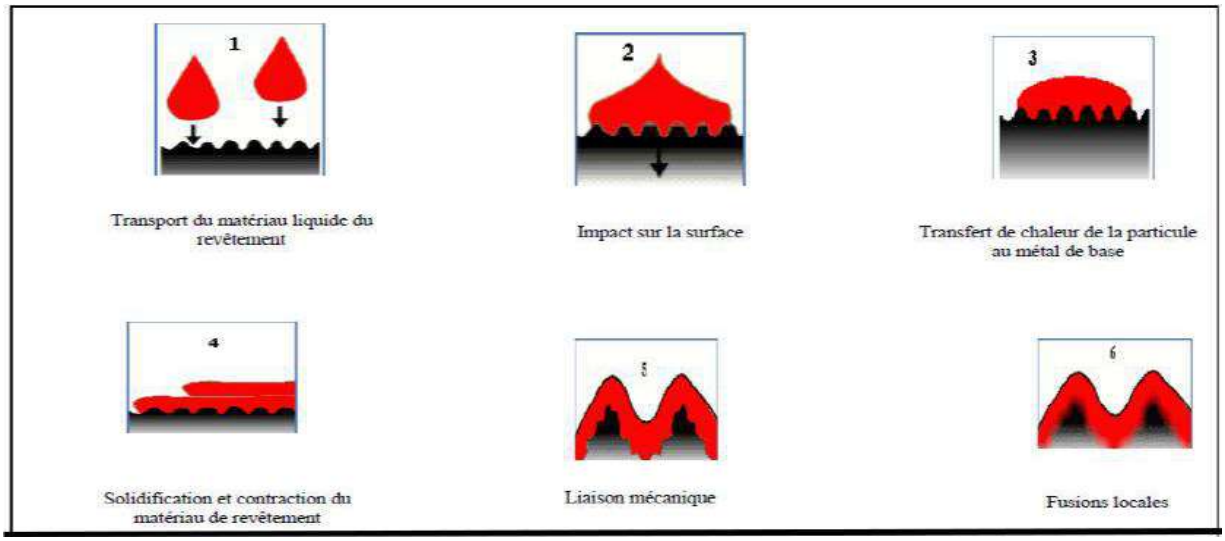


Figure I-26b : processus du dépôt.

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 **[44,46]**.

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) **[47,48]**.

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 **[44,48].** L'augmentation de la température des particules se traduit par une diminution de leur viscosité et la rugosité du dépôt est réduite.

On peut distinguer trois types de porosités : la première est la porosité fermée avec des pores entièrement inclus dans le dépôt, la seconde est la porosité ouverte avec des pores qui présentent une extrémité fermée et une autre ouverte au niveau de la surface du dépôt ou de la surface de coupe et la troisième concerne les pores ou plutôt des fissures qui traversent le dépôt, de sa surface jusqu'au substrat **[49]**.

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

1- l'accrochage mécanique,

2- les liaisons chimiques,

3- les liaisons métalliques.

En considérant la solidification rapide des particules et la microstructure lamellaire des dépôts, l'accrochage mécanique est le mécanisme principal d'adhérence. Le comportement mécanique du dépôt et en particulier son adhésion/cohésion dépendent de la morphologie des

lamelles, des aires de contact réel entre les lamelles ainsi que de la rugosité du substrat **[54, 55]**.

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

La micro dureté est une propriété significative parce qu'elle donne une indication de la résistance à l'usure abrasive. Elle est affectée par la teneur en oxydes et la porosité du dépôt. La dureté des dépôts dépend donc de la nature du gaz de projection. Pour des dépôts d'acier, il a été observé que, avec de l'air comme gaz d'atomisation, une teneur en oxydes plus élevée conduit à une dureté plus élevée, mais en utilisant de l'azote, une meilleure conservation du carbone permet aussi une augmentation de la dureté avec une teneur en oxyde limitée. L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt **[53,48]**.

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 **[57]**.

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 **[58,59]**.

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 **[60,61]**.
- 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 **[62, 63]**.

I.8.6 Définition du champ magnétique :

En physique, dans le domaine de l'électromagnétisme, le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace et permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents.

La présence du champ magnétique se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz) et par divers effets affectant certains matériaux (diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme, etc.). La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique.

Les différentes sources de champ magnétique sont les aimants permanents, le courant électrique (c'est-à-dire le déplacement d'ensemble de charges électriques), ainsi que la variation temporelle d'un champ électrique (par induction électromagnétique*)*.

I.8.7.Matériau ferromagnétique doux :

Les matériaux ferromagnétiques doux forment un sous groupe des ferromagnétiques qui signifie qu'ils sont capables de s'aimanter lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur. La particularité des matériaux ferromagnétiques doux est que l'action de créer ou d'annuler l'aimantation dans le matériau nécessite moins d'énergie que pour les matériaux ferromagnétiques durs.

I.8.8 Applications :

Les transformateurs : Un transformateur contient un enroulement primaire et un enroulement secondaire qui sont magnétiquement couplés. On applique alors une tension alternative à l'enroulement primaire et un flux magnétique va traverser le circuit secondaire, ce qui va créer un courant électrique. Les principales limitations pour ces types de dispositif sont la dissipation d'énergie par cycle d'hystérésis et les pertes par courants de Foucault. L'utilisation de matériaux ferromagnétiques doux limite ces phénomènes.

Les électroaimants : La forte susceptibilité des matériaux ferromagnétiques doux permet d'obtenir une forte induction à partir d'un faible champ extérieur, ce qui trouve son utilité dans les électroaimants, lorsque l'on cherche à canaliser les lignes de champ.
Un électroaimant est composé d'un barreau en fer doux autour duquel une bobine est alimentée par un générateur de courant alternatif. L'application d'un courant permettra alors de créer un champ électromagnétique au centre du dispositif. L'utilisation du fer doux est indispensable afin que le champ magnétique (produit par la bobine) puisse être correctement restitué au reste du circuit.

I.8.9 Matériaux et caractéristiques :

Les matériaux ferromagnétiques doux sont composés des éléments principaux Fer, Cobalt, Nickel, Magnésium, Silicium, et ne possèdent pas de structures ordonnées qui nuiraient aux propriétés magnétiques. C'est pour cette raison que les matériaux amorphes et les matériaux poly cristallins sont de bons ferromagnétiques doux.

❖ I.9.L'état de l'art :

- **Mostaghimi** et al.**[64]** ont montré que le rapport d'aplatissement est lié au nombre de Reynolds et, au nombre de Weber. Cependant, l'effet de la solidification sur la propagation de gouttelette peut être négligé quand le rapport du nombre de Stefan au nombre de Prandtl est beaucoup plus petit que l'unité.
- Zhao et autres **[65]** et Pasandideh-Fard et autres **[66]** ont proposé des modèles détaillés en résolvant l'équation de Navier-Stokes couplée à l'équation d'énergie. Leurs prévisions théoriques de la propagation de gouttelette étaient en bon accord avec les données expérimentales. Cependant, les procédures numériques adoptées

dans ces modèles étaient informatique chères. De tels modèles détaillés sont plus utiles pour obtenir une compréhension fondamentale profonde sur les processus physiques impliqués dans le phénomène d'impact.

- Zhang a proposé un modèle théorique basé sur le volume de fluide (VOF) pour la propagation de gouttelette et la solidification considérant la tension superficielle, la solidification et la résistance thermique de contact. Le rapport splat-flattening a été décrit en fonction des nombres de Reynolds, de Weber, de Prandtl et de Jakob.
- Zhang et autres **[67]** ont étudié la morphologie de l'impact et la re-solidification de substrat numériquement et expérimentalement et ont constaté que la taille, la vitesse, et la température, de gouttelette d'un part et le matériau de substrat et leur température jouent les rôles significatifs dans la morphologie de l'impact et le taux de solidification.
- Tahar et autre ont **[68]** Simulé numérique par la méthode EF / VOF la formation de lamelle, pour étudier l'influence de l'état de surface sur l'accrochage d'une particule de nickel produit par pulvérisation plasma et ils ont constaté que La Préchauffage du substrat joue un rôle important dans la morphologie de l'impact et le taux de solidification.

Dans le même axe de recherche nous proposant dans cette étude la réalisation des expériences numériques pour étudier l'influence de champ magnétique sur un substrat rugueux en acier on présence de couche d'oxyde.

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 2:

MODÈLE MATHÉMATIQUE

Introduction

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

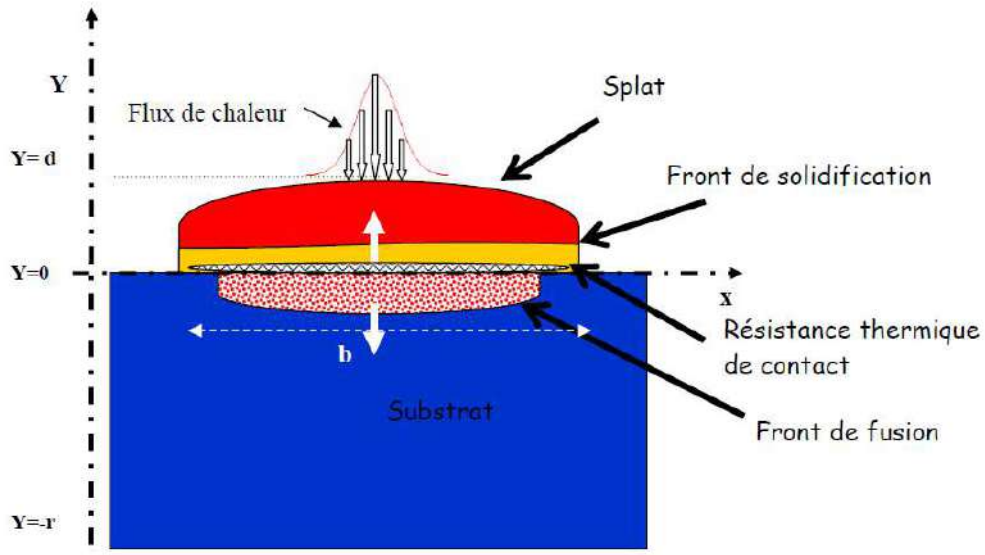
Depuis quelque décennie, Prandtl, Navier-stockes et Reynolds ont pu découvrir les lois fondamentales de la mécanique des fluides, il restait aux ingénieurs et l'homme de science exploiter ces loi et les mètres au service de l'homme.

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

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

II.1.Modèle dynamique

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



(vitesse d'impact; température…).

Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon [69].

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

II.2. Modélisation de l'écoulement des fluides

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

II.2.1. L'équation de la continuité

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

L'équation de continuité globale est donnée par :

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

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

Donc l'équation devient :

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

II.2.2 .L'équation de quantité de mouvement

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

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

Ou **ρ** la densité considéré variable avec le temps, **μ** fi la viscosité dynamique aussi variable, P la pression et $\vec{g}$ la gravité. [70]

II.2.3. Équation de l'énergie

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

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

T : température,

q : source volumique. [70]

II.3. Modèle thermique

Les modèles de transfert thermique unidimensionnel couplés aux modèles qui décrivent l'étalement de la matière sur le substrat traite le refroidissement et la solidification des lamelles comme un problème uniquement thermique. Ce sont des modèles simples comparés aux modèles de l'écoulement de la phase fluide comme ceux développés par Mostaghimi et Al qui traite la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leur morphologie, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière[69] .

II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) [71]. C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré comme une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan [72]. En général ces méthodes cherchent à approcher la position du front de solidification/fusion au cours du temps, et se divisent alors en deux catégories principales:

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

II.3.1.1. Méthode à grille mobile

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante [73] :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

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

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

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

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

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

Dans les équations ci- dessus,

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

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

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif, le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier [73].

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

II.3.1.2. Méthode à grille fixe

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

II.3.1.3.a. Méthode d'enthalpie

La méthode d'enthalpie à maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide. Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et al [74]. Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'à aujourd'hui [75].

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

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

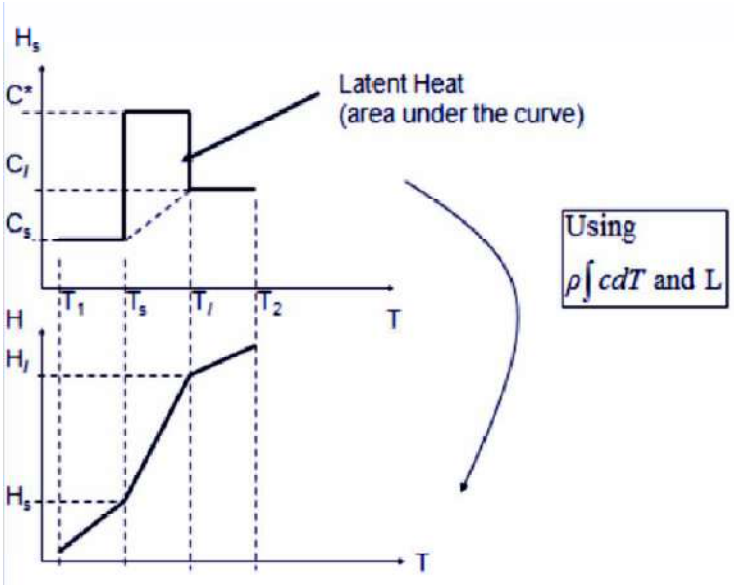


Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température

La conservation de l'énergie s'exprime alors.

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

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

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

Et en fonction de la température

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

II.3.1.4.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique c_p[76]. Ainsi, si le chemin de solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente :

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

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

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

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

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

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

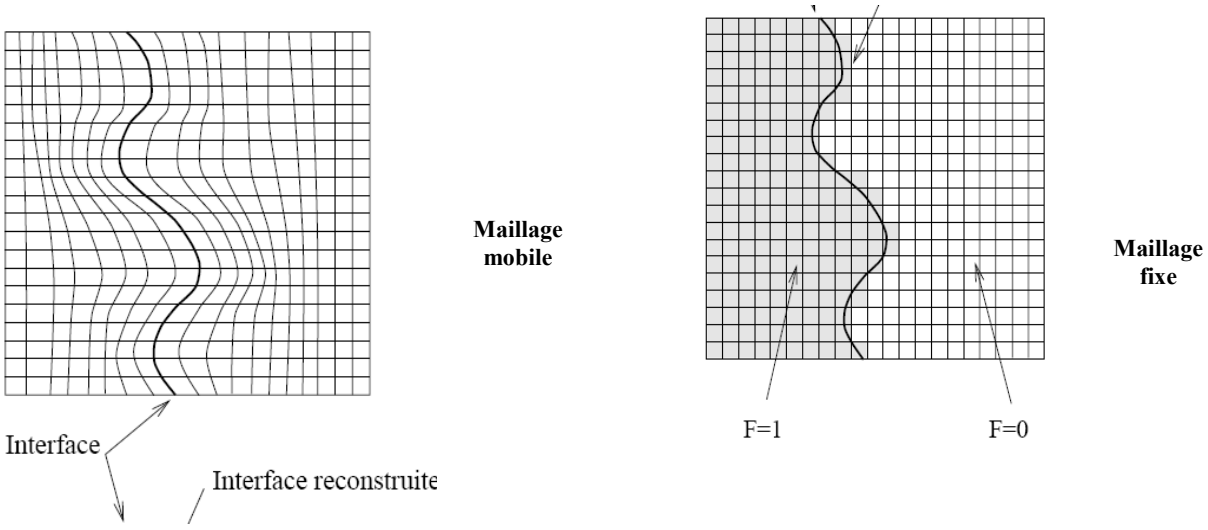
II.4. Modèle thermique utilisé

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

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

II.5.Calcul d'interfaces

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



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

Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface
a) méthode Lagrangienne**, b)** méthode Eulérienne**,** [77].

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

- **La méthode eulérienne** : elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides .l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première [78] ; cependant de part sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation couleur.

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

Les méthodes de suivi de front

Les méthodes de suivi de volume

II.5.1. Les méthodes de suivi de front

Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

c) Méthode de ligne de niveau (level set)

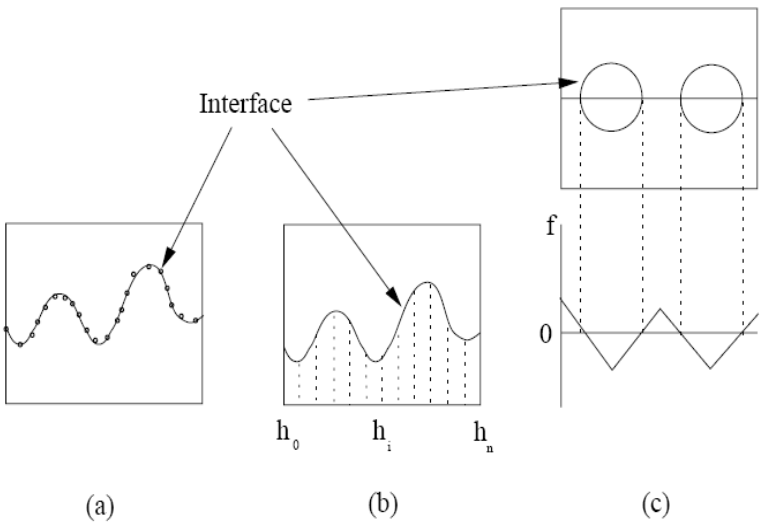


Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de front

a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau, [79].

II.5.2. Les méthodes de suivi de volume

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

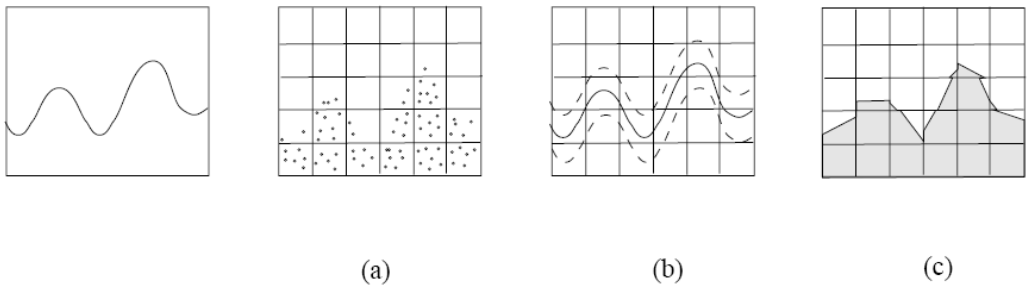


Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [80,81].

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

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

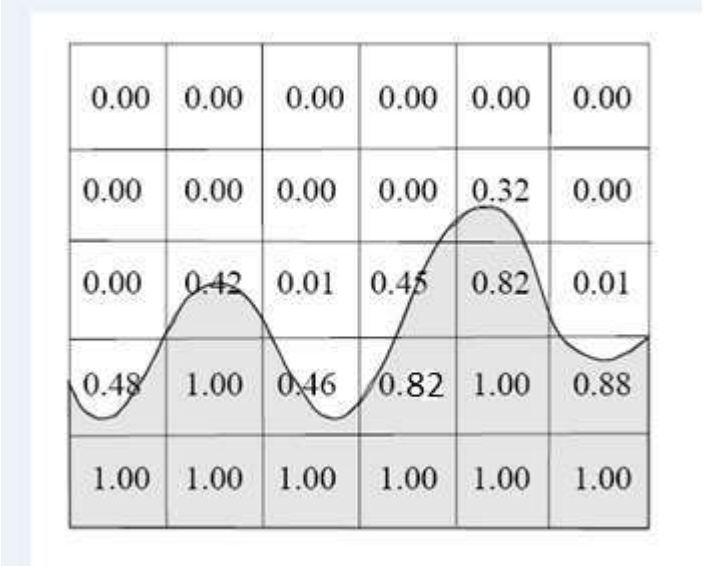


Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [82].

II.5.3. La Méthode VOF CIAM

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

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

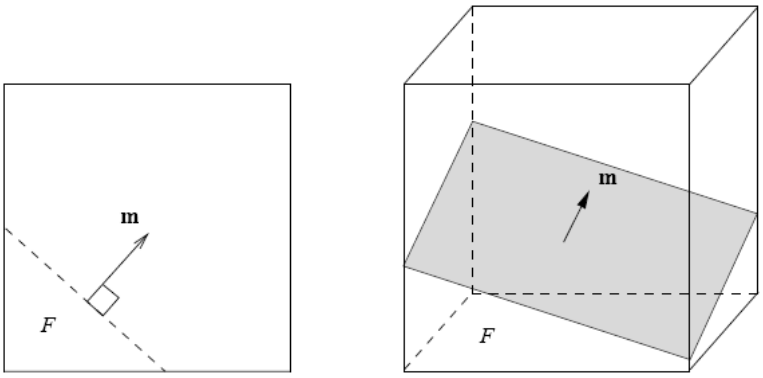


Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique [83].

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

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

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

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

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc.

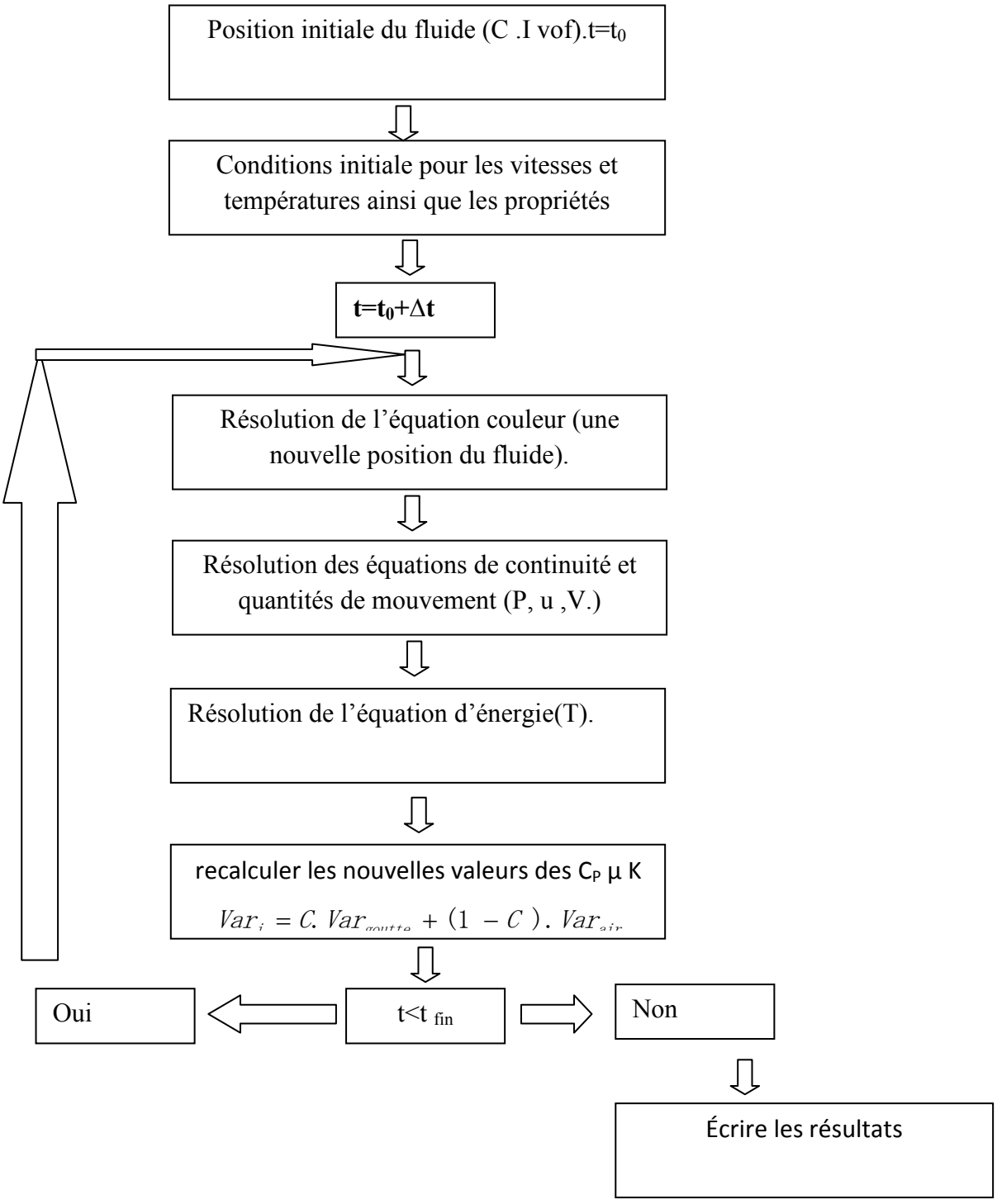


Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le tempe.

Conclusion

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

CHAPITRE 3:

MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Introduction

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

• Méthodes des différences finies (MDF).

• Méthodes des éléments finis (MEF).

• Méthodes des volumes finis (MVF).

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

III.1. Discrétisation des EDP

III.1.1. les trois grandes familles de méthodes

Pour passer d'un problème exact continu régit par EDP au problème approché discret, il existe trois grande famille de méthodes : [84]

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

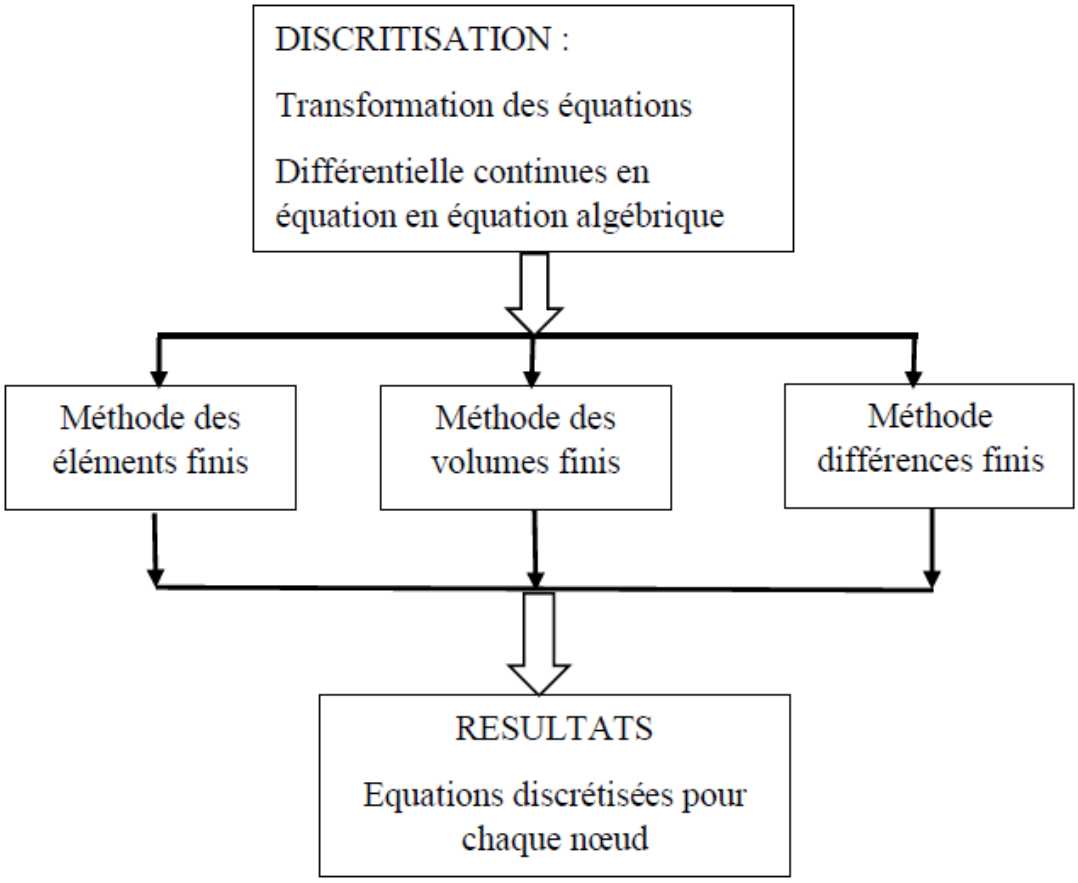


Figure III.1 : Méthode de discrétisations [85]

La méthode numérique comporte trois pas distincts :

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

La principale différence entre les trois méthodes numériques consiste dans le type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisations. [85]

III.1.1.1. Méthode des différences finies

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

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

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

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

III.1.1.2.Méthode des volumes finis

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de volume de contrôle juxtaposés. Chacun de ces derniers englobe « un nœud principale».
La méthode intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle de l'approximation discrète conservation et est particulièrement bien adaptée bien aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple avec est simple avec des volumes élémentaires rectangles. [86]

- **Avantage :**

- Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (Continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage.
- Mise en œuvre relativement facile ;
- Applicable aux géométrises complexes ;
- Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande). [85]

- **Inconvénients :**

- Moins précis que les méthodes spectrales ;
- On dispose de peu de résultats de convergence. [85]

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

utilise la fonction de phase comme la fraction volumique d'un fluide par rapport à l'autre [87]. La fraction volumique dans la cellule (i, j) est défini par :

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

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

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

III.1.1.3.Méthode des éléments finis

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

- **Avantage**

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

- **Inconvénients**

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

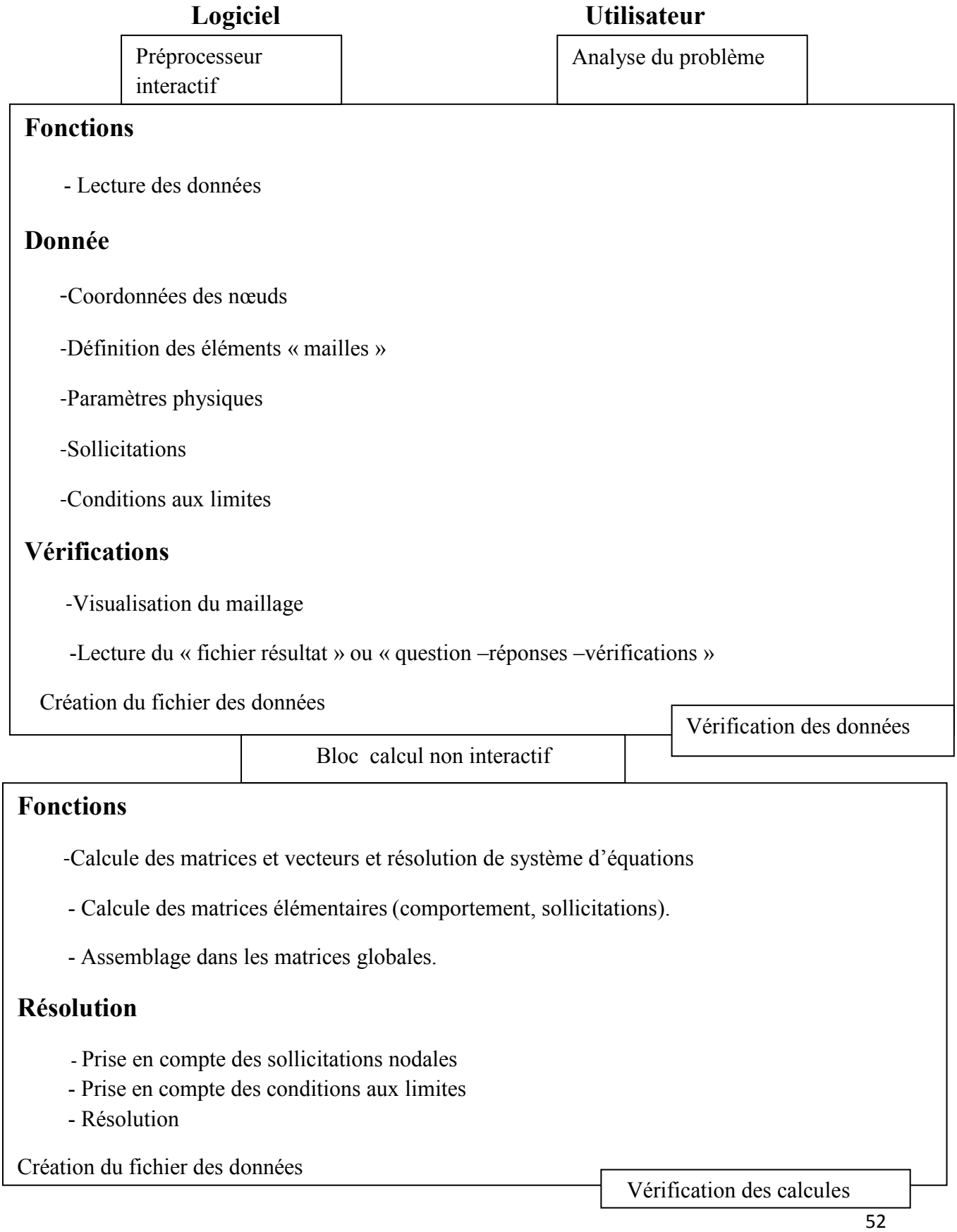
III.1.1.3.1. Démarche éléments finis

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

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations. [87]

III.1.1.3.2.Organigramme d'un logiciel élément finis

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



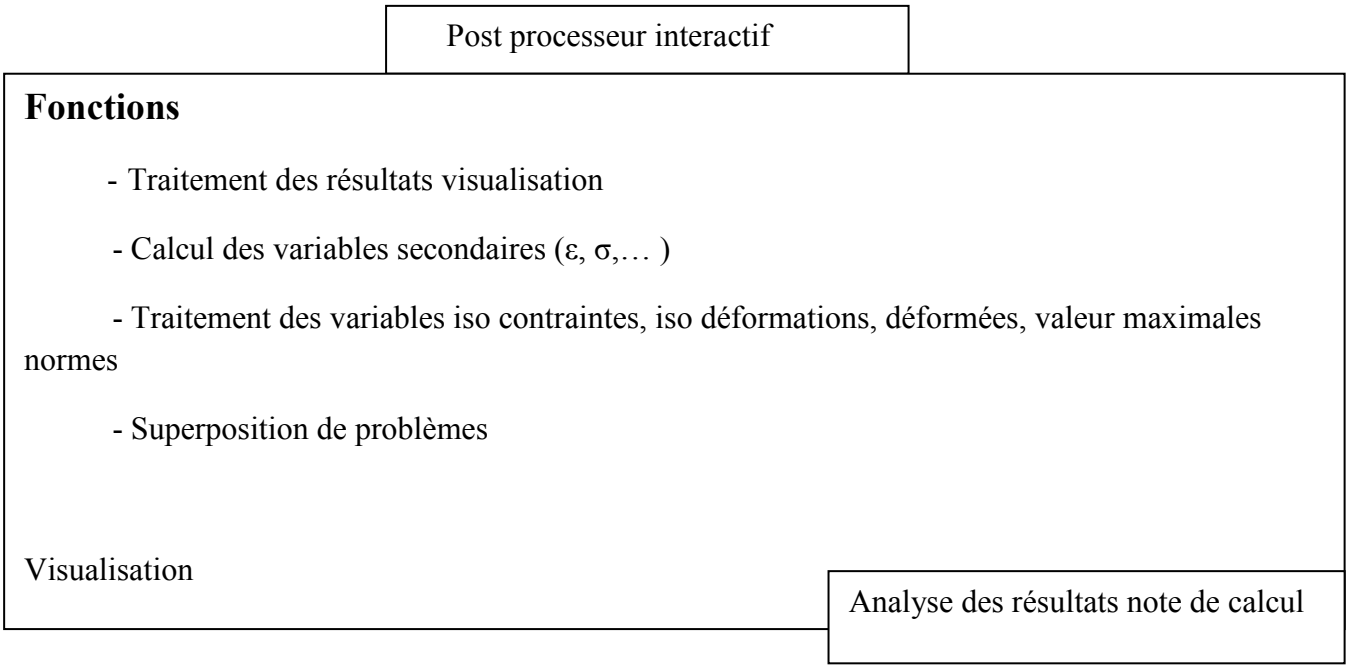


Figure III.2 : Organigramme d'un logiciel éléments finis [87].

III.1.1.3.3. Présentation de la méthode

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

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

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

III.2. Forme générale des équations du système [88]

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

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

Ou :

φ: Variable généralisée

Cφ: Coefficient d'advection transitoire.

ΦΓ: Coefficient de diffusion.

Sφ: Termes source

Variable Ø	coefficient d'advection $c_\emptyset$	Diffusivité $\Gamma_\emptyset$	Termes source $S_\emptyset$
V_X	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}$
Vy	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\lvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}\right\rvert\frac{\nabla_c}{\lVert\nabla_c\rVert}$ + JB
T	1	$\frac{k}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{\rho c^e}$
ρ	1	0	0

Tableau III.1 : Tableau de Représentation d'équation de transport. [88]

III.3.choix d'un maillage

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

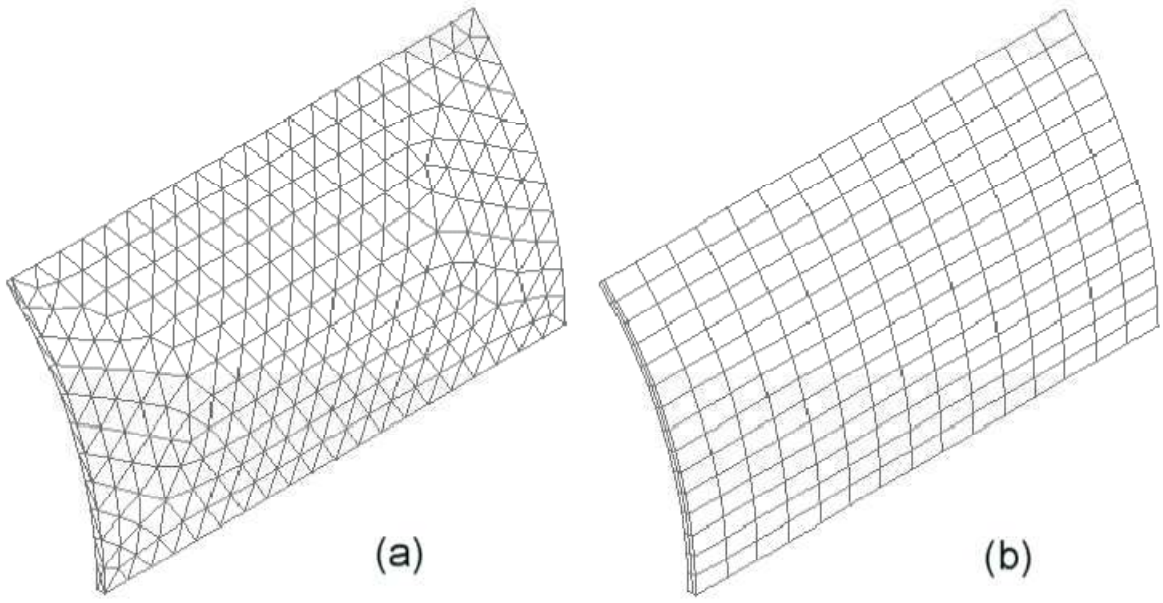


Figure III.3 : (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique

III.3 .1.Discrétisation

La discrétisation de ces équations permet de convertir les équations aux dérivées partielles en équations algébriques qui sont alors résolues par les méthodes numériques Traditionnelles, le procédé de discrétisation par élément fini consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire [89].

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

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

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

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

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

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

III.3.1.1.Terme temporelle

Le premier des contributions de l'élémentaire est le terme de transition, sa forme générale est simplement [89] :

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

Avec :

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

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

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

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

Si l'approximation localisée de masse est employée

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

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

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

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

Ou :

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

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

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

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

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

Où :

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

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

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

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

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

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

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

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

III.3.1.2. Terme d'advection

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

III.3.1.3. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

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

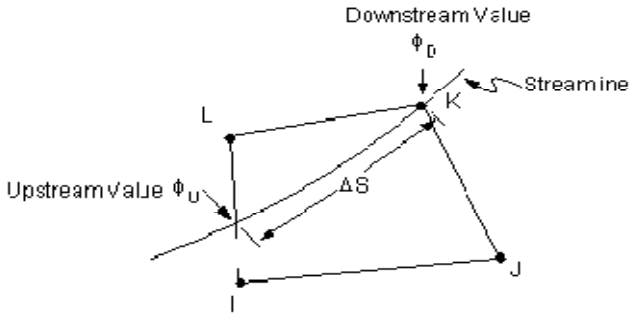


Figure III.4 : Approche de ligne de courant d'Upwind [88].

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

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c'est-à-dire, tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit [88] :

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

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

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

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

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

Où:

D = Indice de la valeur au niveau du nœud aval

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

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

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

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

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

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection [88] :

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}}\int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e \partial W^e}}{\partial x} + \frac{\mathbf{V_y^e \partial W^e}}{\partial y}\right\}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}}{\partial x} + \frac{\mathbf{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}}{\partial y}\right\}\mathrm{d(vol)} \quad \text{(III-20)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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

III.3.1.5. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

L'approche de COLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué. Dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesses, (les vitesses nodales élément-élément-based) qui sont faites pour satisfaire l'équation de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement [88].

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}}\int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e}\partial \mathbf{W^e}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V_y^e}\partial \mathbf{W^e}}{\partial \mathbf{y}}\right\}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e}\partial(\rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V_y^e}\partial(\rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset)}{\partial \mathbf{y}}\right\}\mathrm{d(vol)} \quad \text{(III-21)}$$

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

III.3.2.Terme de Diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au-dessus du domaine de problème après la multiplication par la fonction pesante [88].

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

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée [89] :

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

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

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

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

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

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

III.3.3.Termes source

L'évaluation des termes de source se fait comme suite [89]:

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

Conclusion

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

CHAPITRE 4: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'étude de la simulation numériques d'impact d'une goutte de nickel sur un substrat d'acier comparer avec la simulation numériques d'impact en présence de champ magnétique sur un substrat d'acier.

IV.2 ANSYS :

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

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

- **Les points forts des outils ANSYS sont :**

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

➢ Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux :

- ANSYS Design Scape est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces les constituants.

- ANSYS Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires : mécaniques et thermiques. Il comprend des outils de contrôle avancés tels que les options de contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, les combinaisons de solution, le post traitement de zones de contacts.

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

➢ Schéma de logiciel ANSYS :

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

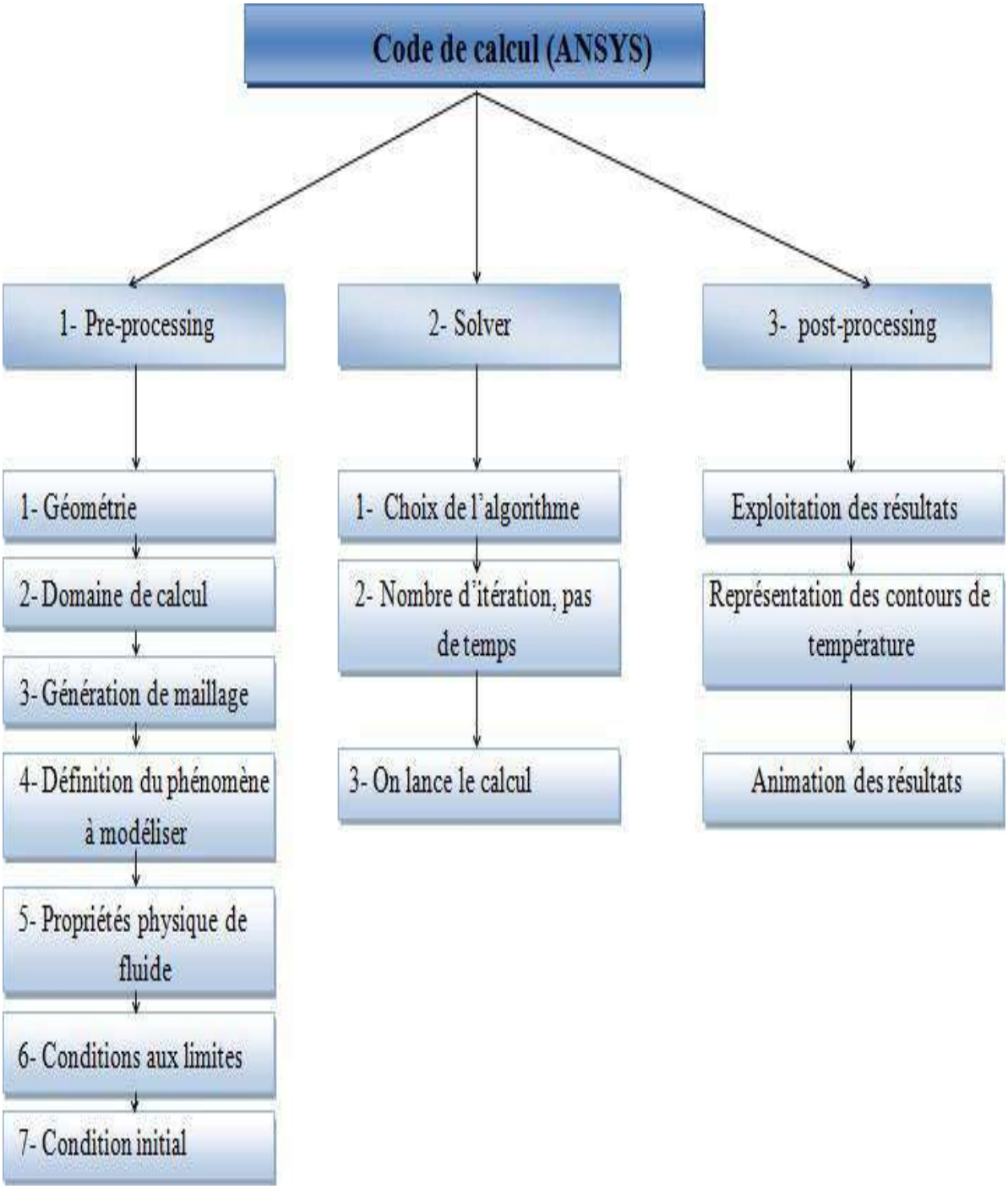


Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV -3.Matériaux utilisés :

Dans cette étude numérique nous sommes intéressés à des particules de nickel fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat d'acier, le choix de nickel a été orienté par des nombreuses études déjà menées. Sur substrat métallique, la composition et l'épaisseur de la couche d'oxyde qui croit en surface et dont la croissance progresse avec la température de préchauffage du substrat, joue un rôle important dans le processus de formation des lamelles.

➢ IV.3.1 le nickel :

- une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de 310,000 j/kg.
- une bonne conductivité électrique=14,3×10 s m .$^{-1}$
- une bonne conductivité thermique= 90,7 W$\cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.
- une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux alcalins, aux halogènes.
- aux métaux et une bonne résistance a l'oxydation.

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

Propriétés	Nickel	Acier oxydable	Couche d'oxydation (Fe_2O_3)
Densité (Kg/m³)	7900	7900	5240
Conductivité thermique de Nickel (W/m K)	90.7	26	2.9
Chaleur spécifique liquide (J/Kg K)	609	-	670
Conductivité thermique solide (W/mk)	°C	°C	
	527 67.6	127 16.6	-
	727 71.8	327 19.8	-
	927 76.2	527 22.6	-
	1227 82.6	727 25.4	-
		927 28.0	-
		1227 31.7	-
Chaleur spécifique (J/Kg K)	°C	°C	
	527 530	127 515	-
	727 562	327 557	-
	927 594	527 582	-
	1227 661	727 611	-
		927 640	-
		1227 682	-
Tension superficielle [N/m^2]	1.778	-	-
Viscosité cinématique [m /s]	6.E-7	-	-
Chaleur de fusion [j /kg]	310,000	-	-

Tableau IV- M 1 : Les prospérités des mâtereaux utilisés (Xue et al., 2006) [90].

- **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 un substrat dans les mêmes conditions des travaux numérique et expérimental de **Tahar.**

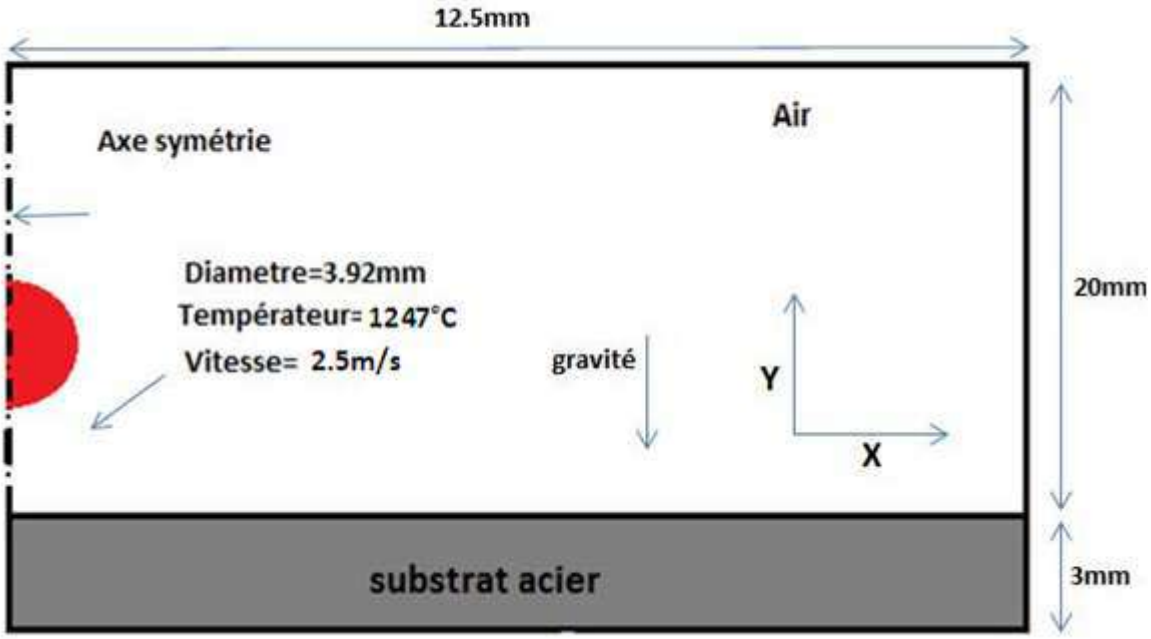


Figure IV-2: configuration géométrique et conditions d'étalement pour l'identification

La figure IV.2 : représente les résultats de simulation de l'impact d'une particule en nickel d'un diamètre de 3.92mm initialement à une température de 1247°c et à une vitesse de 2.5 m/s sur un substrat en acier initialement à 200^{o}C. La gouttelette commence a se propagé à 0.1 ms, le liquide suit la topographie de la surface.

- **IV.4.1.impact d'une particule de nickel totalement fondue :**

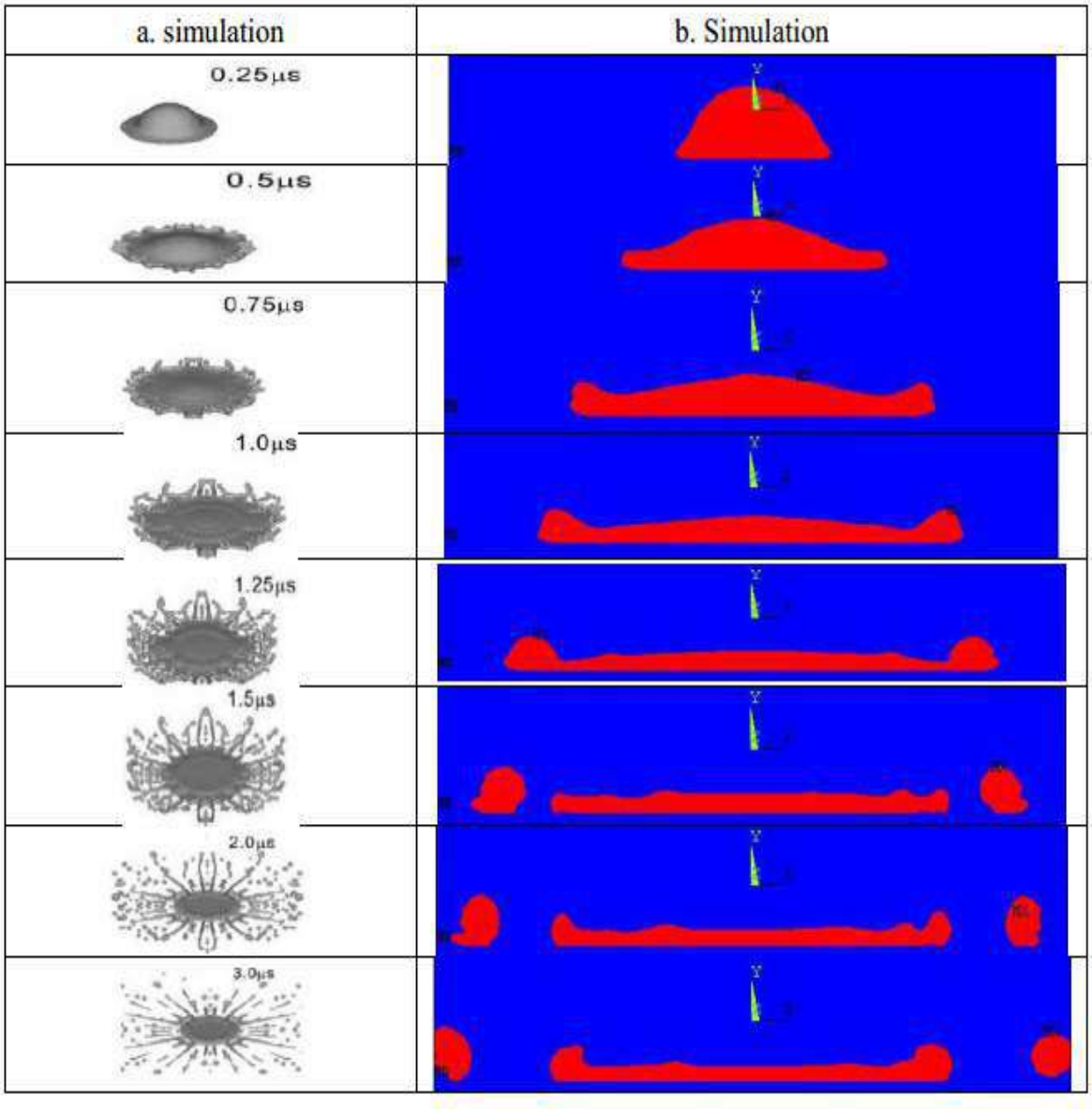


Tableau IV- M 2: impact séquentiel d'une particule de nickel de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 2.5m/s et une température de1247°C sur un substrat en acier initialement [90].

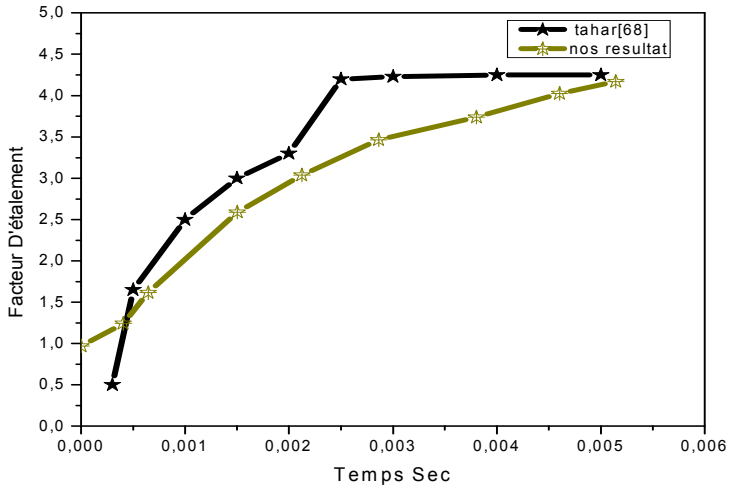


Figure IV-4: facteurs d'étalement

Sur la figure IV- 4 : qui représente l'allure de la variation du facteur d'étalement, lors de l'impact de la particule de nickel initialement à une température 1247°C avec une vitesse initiale d'impact égale à 2.5 m/s comparer à celle obtenue par Tahar et al. Dans les mêmes conditions. Et de même pour les figures du tableau IV M2 qui représente la dynamique de l'étalement, nous constatant le bon accord entre les deux résultats.

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

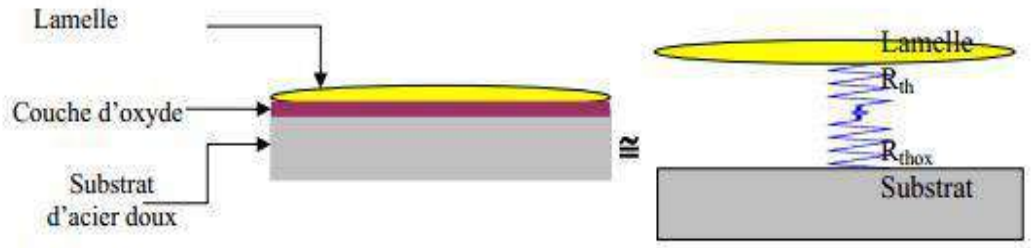


Figure IV-5: Schéma représentant le contact lamelle/substrat après l'oxydation de la Surface.

IV-5.Configuration et conditions 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 Fe_2O_3 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 0.01 à 0.03 mm dans le cas du substrat d'acier préchauffé à 1247 °c, et de l'ordre de 0.1 mm dans celui de l'acier. Nous avons introduit cette couche d'oxyde dans les calculs de solidification des lamelles de nickel projetées sur des substrats métalliques Pour les calculs, nous avons fixé :

- la température initiale de la gouttelette considérant une particule de nickel T=1247°c
- la température initiale du substrat T=200°c
- vitesse le la gouttelette 2.5m/s

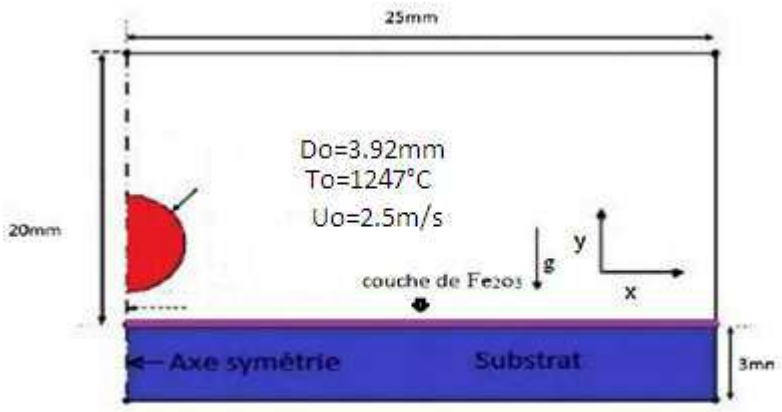


Figure IV-6 : Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation

IV-6.Rugosité du substrat :

La topographie du substrat conditionne l'adhérence mécanique de la goutte sur le substrat, mais affecte également la mouillabilité de la surface. En considérant une surface présentant un profil sinusoïdal idéal, représenté sur la Figure I-40, il est possible, par exemple, de montrer que la rugosité peut empêcher le proche contact entre la goutte et le substrat et affecte donc la mouillabilité de la surface

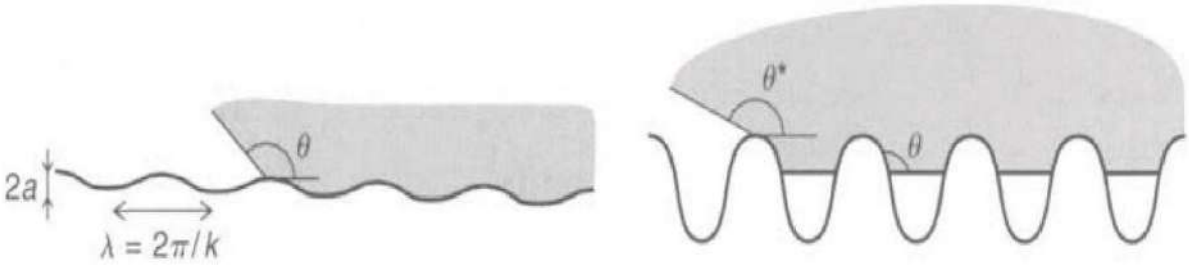


Figure IV-7 *:* Représentation d'une surface au profil sinusoïdal idéal. Pour des faibles amplitudes, le liquide suit le profil de la surface ; mais pour des amplitudes plus élevées, des poches d'air se forment sous le liquide.

La rugosité peut être définie en 2 dimensions, sur la ligne de profil d'une surface ; ou en 3 dimensions pour la surface dans son entier. En 2D, les deux paramètres les plus utilisés sont définis sur une longueur de base :

-Rz, représenté sur la Figure IV-7, correspond à la hauteur maximale du profil, soit la somme du pic le plus haut avec la vallée la plus basse ;

-Ra, représente la moyenne arithmétique des hauteurs des pics et des vallées d'un profil.

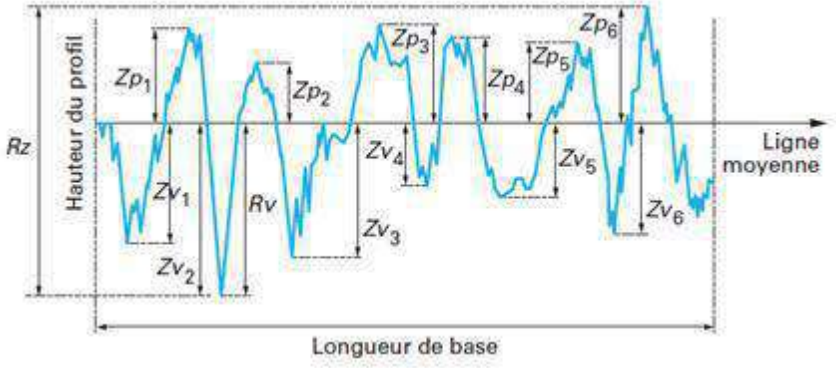


Figure IV-8 : Représentation de Rz sur un profil de surface

Les paramètres correspondant à Ra et Rz sont en 3D, Sa et Sz. Ils représentent, respectivement la moyenne arithmétique des hauteurs des pics et des vallées d'une surface, et le pic le plus haut de la surface.

IV-7.Premier cas :

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact de particule en nickel sur un substrat oxydé rugueux.

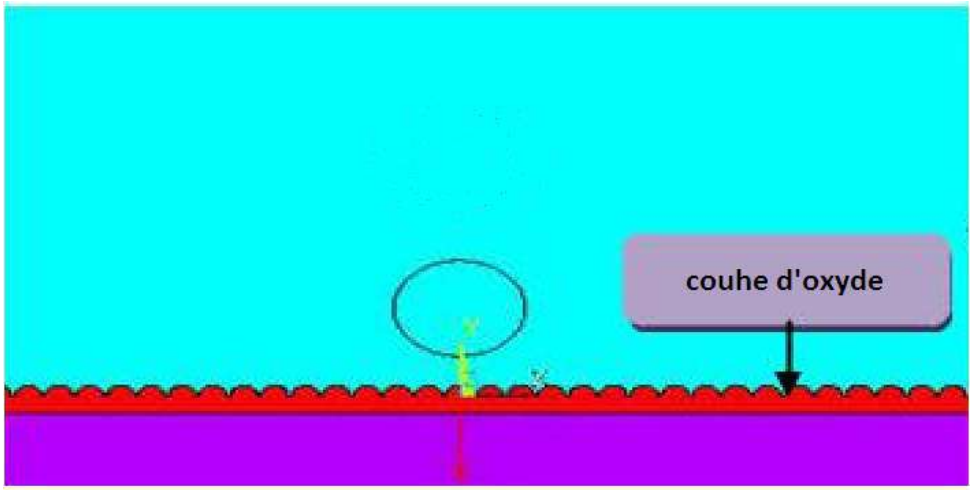
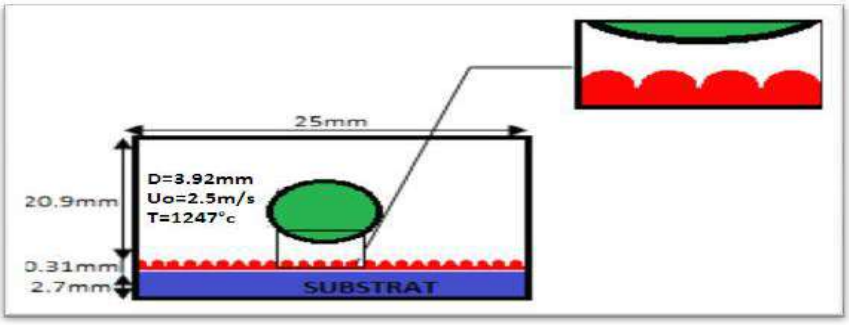


Figure IV-9*:* configuration géométrique de l'impact de gouttelette de nickel de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C avec une vitesse de 2.5m/s.

L'impact de particule de nickel sur un substrat oxydé comporte des Rugosité avec une vitesse de 2.5 m/s.



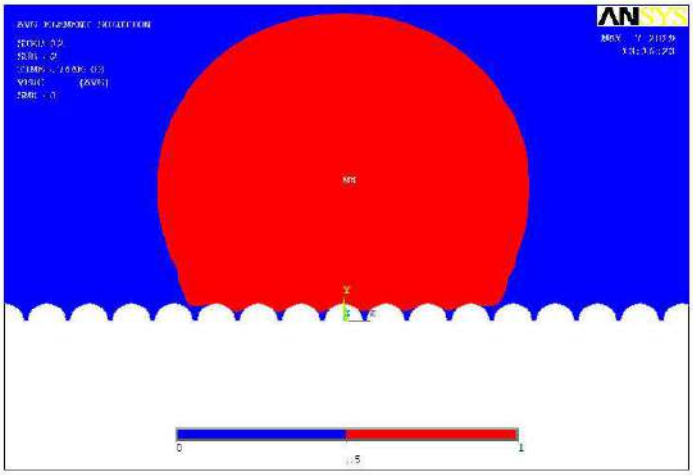


Figure IV-10 : l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement des gouttes.

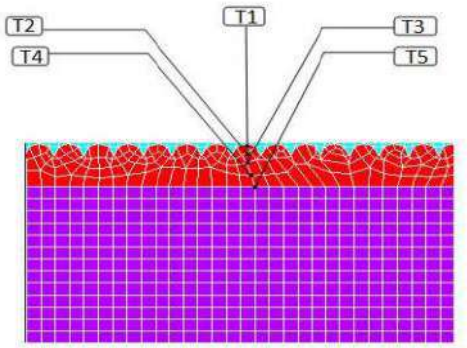


Figure IV-11 : Position des points de température

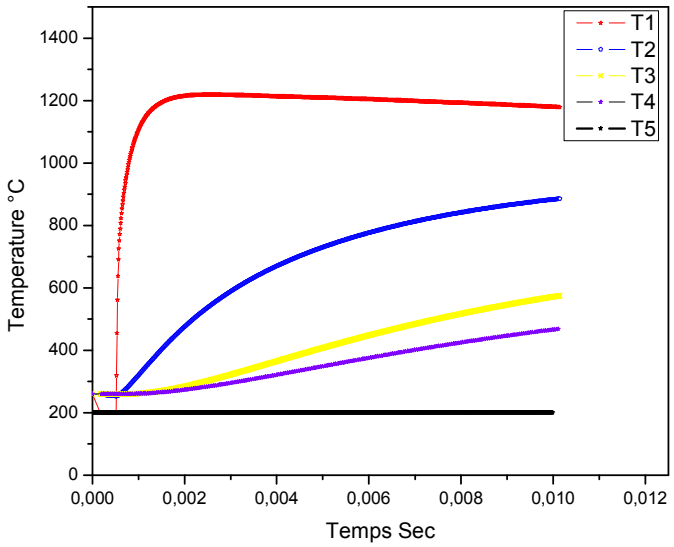


Figure IV-12 : Profils de température en fonction de temps pour cinq positions dans le substrat Verticalement.

D'après cette figure IV-12 : 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.

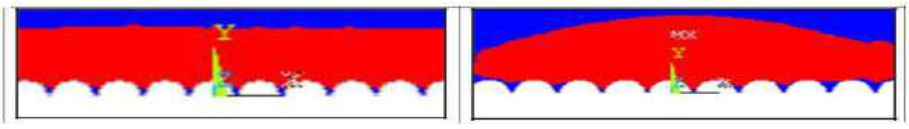


Tableau IV- M 3: l'influence de la topographie du substrat sur l'accrochage de goutte

.

Le Tableau IV- M 3: Montre L'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte pour le premier cas l'étalement et presque parfait et les aspérités sont remplis ce qui montre un bon accrochage mécanique mais dans le deuxième cas en remarque un éclaboussement de nickel alors la rugosité peut empêcher le proche contact entre la goutte et le substrat et affecte donc la mouillabilité de la surface. Aussi en note que la forme de remplissage des aspérités est concave dans les deux cas se qui est favorable pour un bon accrochage.

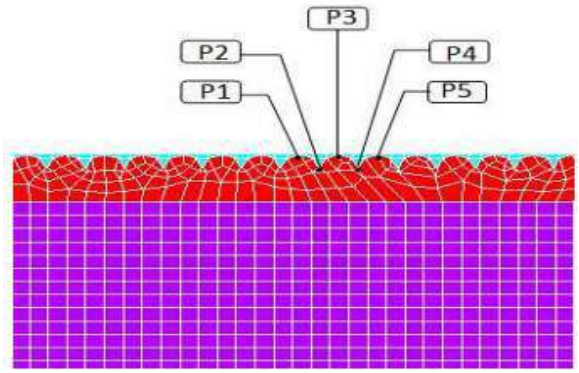


Figure IV-13 : Position des points de pression

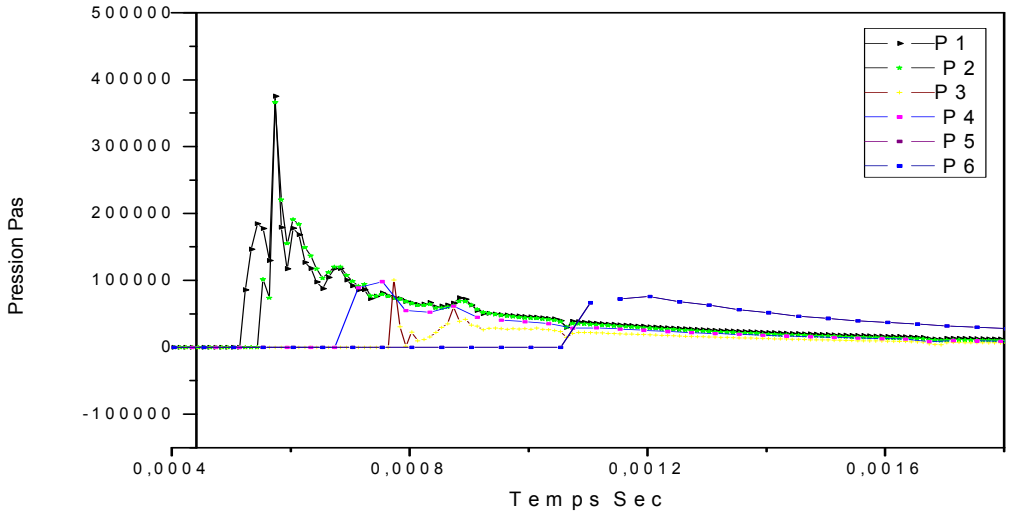


Figure IV-14:la variation dans le temps de la pression d'impact à l'interface Particule/substrat .

Illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (385KPa), nécessaire et suffisante pour un bon accrochage mécanique, 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.

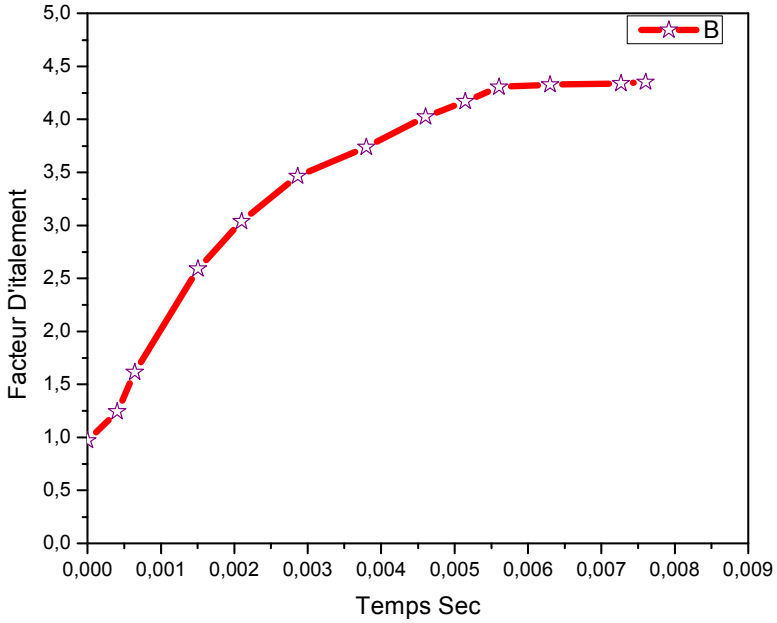


Figure IV-15 : Facteur d'étalement de la chute de nickel de3, 92 mm de diamètre avec une vitesse d'impact de 2,5 m /s sur un substrat oxydé.

D'après cette figure IV-15 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=5.5ms 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.

- **Premier expérience :**

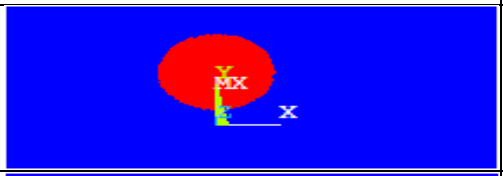
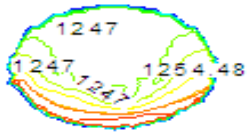
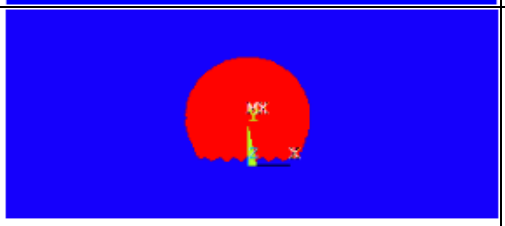
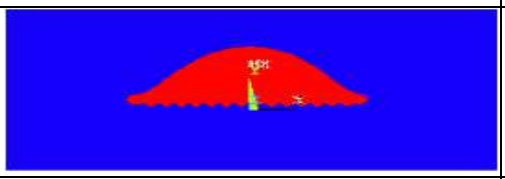
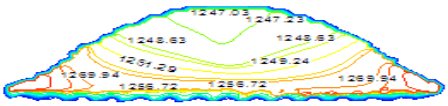
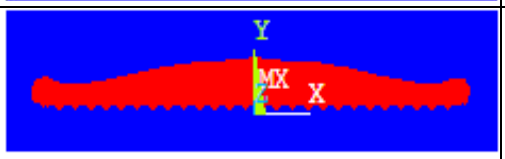
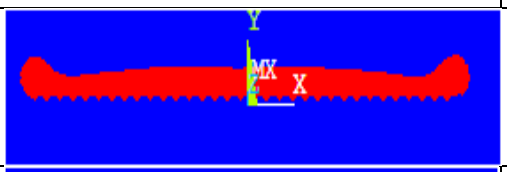
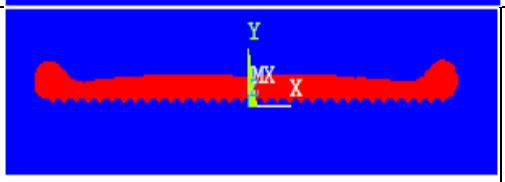
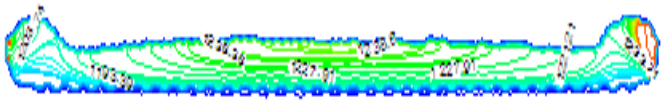
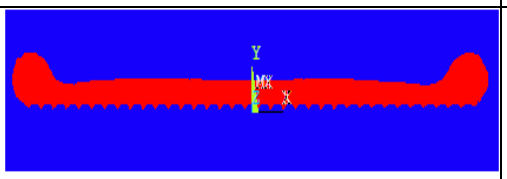
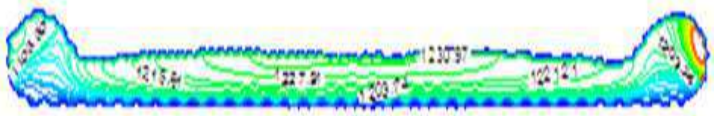
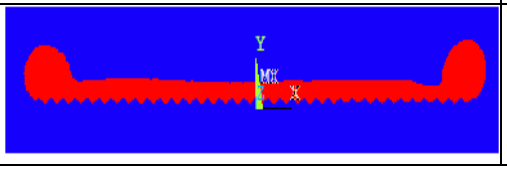
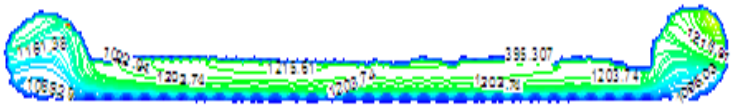
Temps	Volume fraction	Température
0.27 ms		
0.72 ms		
1.2 ms		
2.8ms		
4.6 ms		
5.1ms		
6.1ms		
8.1ms		

Tableau IV-M 4: distribution de la température lors de l'impact d'une particule de nickel initialement avec une vitesse de 2.5m/s et une température de 1247℃ sur un substrat initialement 200℃.

Le Tableau IV-M 4: représente la distribution de température pendant l'impact de la gouttelette ou le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observé que les extrémités de lamelle enregistre un retard de refroidissement et de solidification , Ceci est dû au flux radial et à la viscosité de nickel. De plus, on note pour ce cas que la couche d'oxyde a amélioré l'étalement.

IV-7.1.Conclusion partielle :

D'après les résultats obtenus on peut faire les constatations suivantes :

Les caractéristiques important qui influence sur l'étalement et la solidification de gouttelette De nickel sur une surface de substrat d'acier oxydée, ainsi que la pression d'impact de la particule est liée à l'adhérence au substrat, cependant les particules génèrent une pression relativement importante par leur temps. Après l'analyse de résultat de simulation ou peut conclure :

- La pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une bonne adhérence goutte/substrat.
- la température est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle), elle est influencée par le diamètre des pics qui favorise la forme concave, provocant des tensions d'accrochage.
- La couche d'oxydation formée sur le substrat et sont épaisseur joue un rôle très important sur l'étalement de lamelle en diminuant la résistance thermique, favorisant la solidification rapide de lamelle.

IV-7.2. Deuxième cas :

IV-7.2. 1. Etude de l'effet de champ magnétique sur la formation des lamelles :

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact et comparée l'influence de champ magnétique sur l'étalement de particule en nickel sur un substrat rugueux.

IV-7.2.2.étude de Forme 1 :

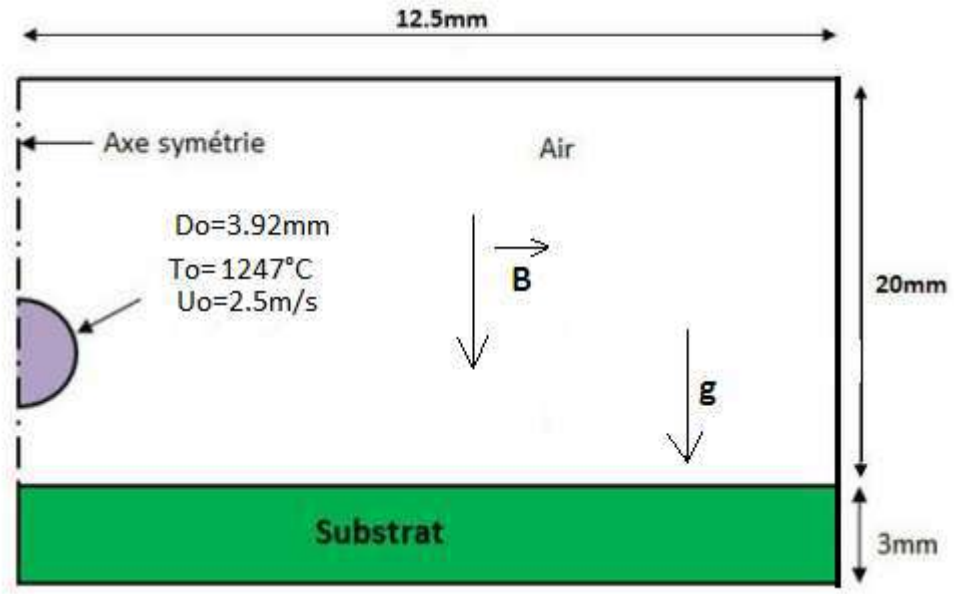


Figure IV-16: Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation

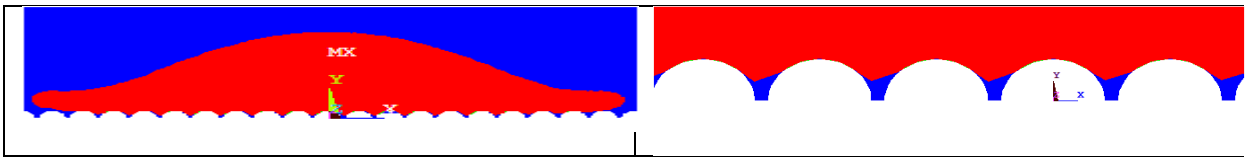


Tableau IV-M 5 *:* l'influence de la topographie du substrat sur l'accrochage de goutte.

Le Tableau IV-M 5 représente l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte, montre l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement des gouttes. Dans ce cas, les aspérités sont remplies d'une manière concave et presque parfaite. De là, on note ce remplissage favorise le bon accrochage mécanique.

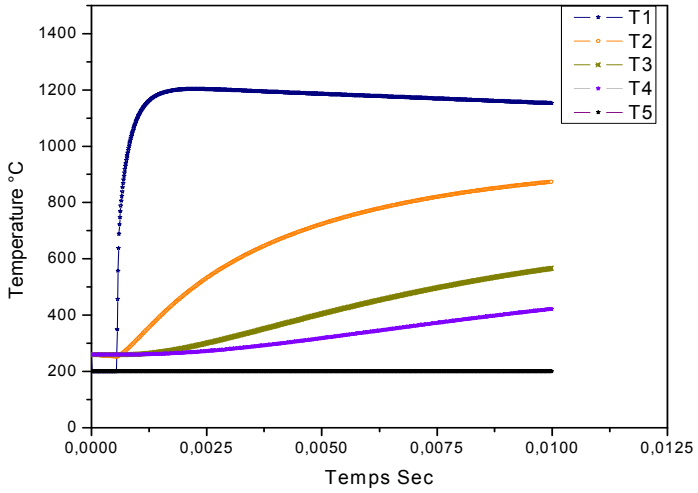


Figure IV-17: profiles de température en fonction de temps pour cinq positions dans la substrat verticalement pour le cas B.

D'après la Figure IV-17:qui représente les profiles de température en fonction de temps pour cinq positions Au long de substrats verticalement pour le cas B. On note que la température de substrat augment pour les cinq positions.

- la température au point d'impact égale à 1247°c puis reste quasi-constante.
- Au dessous de point d'impact la température diminue.
- en éloignant de ce dernier, la température reste quasi- constante T=200 °c.

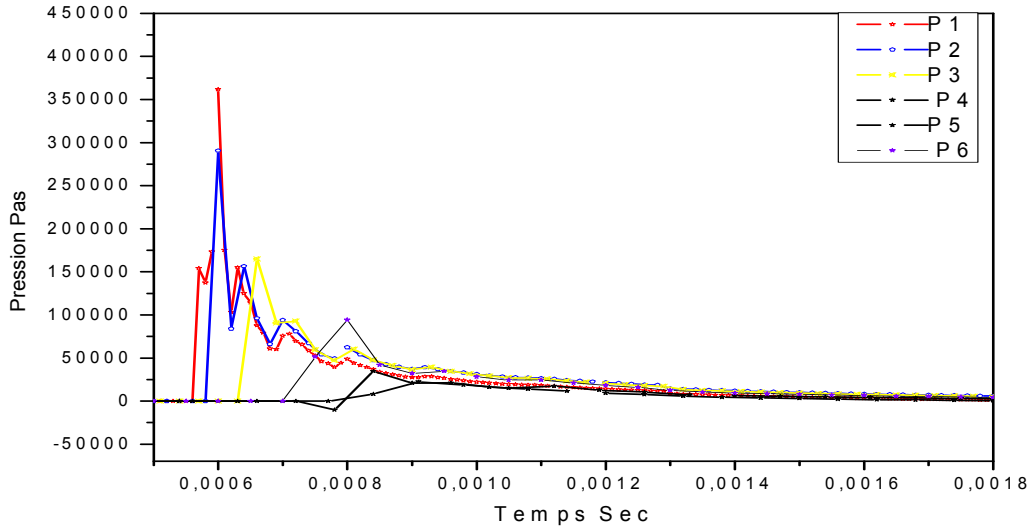


Figure IV-18: profils de pression en fonction de temps pour six positions dans le substrat pour le cas B.

D’après la figure Figure IV-18 : qui représente les profils de pression dans le substrat, nous remarquons aussi :

- initialement la pression est plus élevé au point d’impact (sous la lamelle) P= 365 kPa qui produit une faible résistance de contact (bonne interaction goutte /substrat) puis elle se désintègre vers zéro très rapidement.
- Aux points plus loin de point d’impact la pression diminue de point à l’autre.

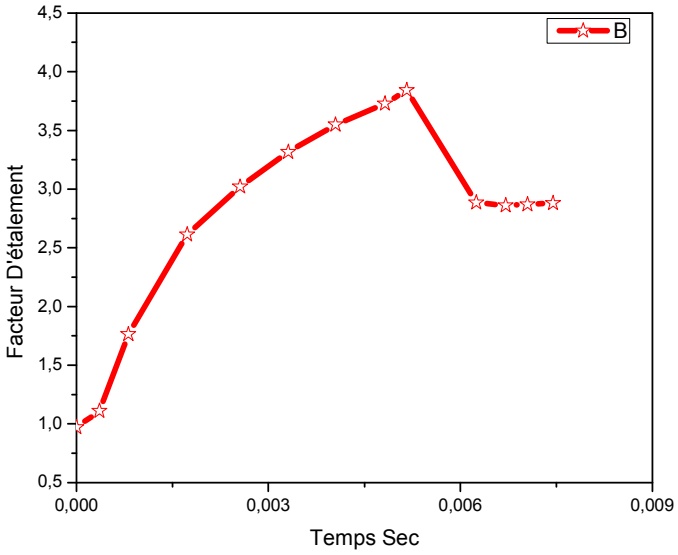


Figure IV-19 : Facteur d'étalement de la chute de nickel de3,92 mm de diamètre avec une vitesse d'impact de 2,5 m /s sur un substrat oxydé .

La figure IV-19 : représente L’évolution de facteur d’étalement de la goutte de nickel 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 2.85 Cela est dû à l’éclaboussement des lamelles en raison de l’impacte de champ magnétique.

➢ **Deuxième expérience :**

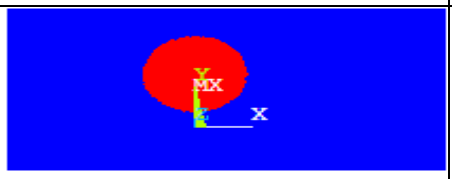
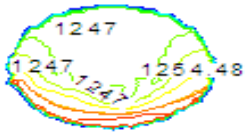
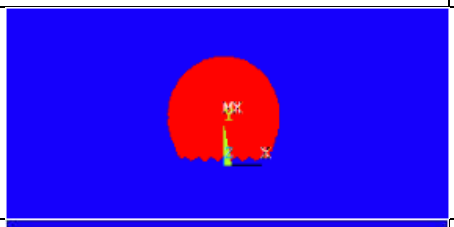
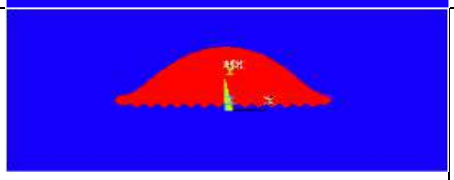
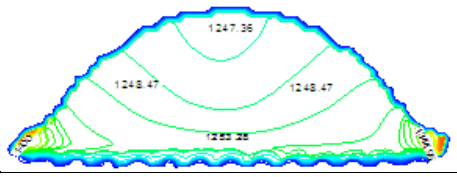
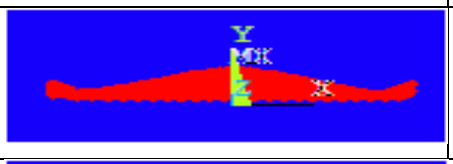
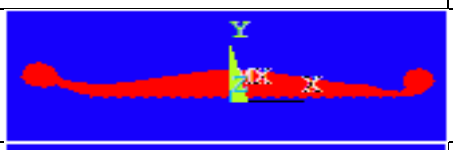
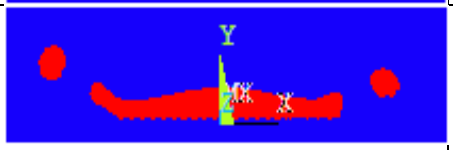
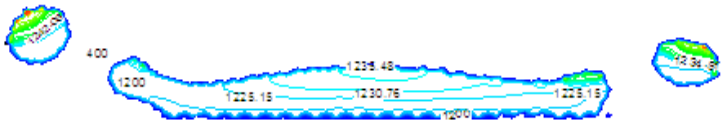
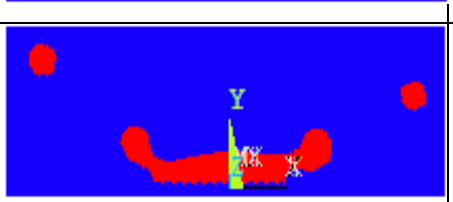
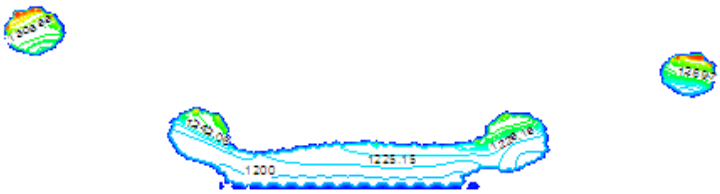
Temps	Volume fraction	Température
0.27 ms		
0.72 ms		
1.2 ms		
2.8ms		
4.6 ms		
5.1ms		
6.1ms		
8.1ms		

Tableau IV-M 6*:* distribution de la température lors de l'impact d'une particule de nickel initialement avec une vitesse de 2.5m/s et une température de1247℃ sur un substrat initialement 200℃ CAS2.

Le tableau IV-M 6 représente la distribution de température pendant l'impact d'une particule à une température de 1247°C sur un substrat d'acier rugueux à 200 °C. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que, les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard. Au de la de t=4.6ms, on note un éclaboussement des lamelles. Est due principalement aux forces de champ magnétiques.

.

IV-8.troisième cas:

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact avec l'influence de champ magnétique sur l'étalement de particule en nickel sur un substrat rugueux.

IV-8.1.étude de Forme 2 :

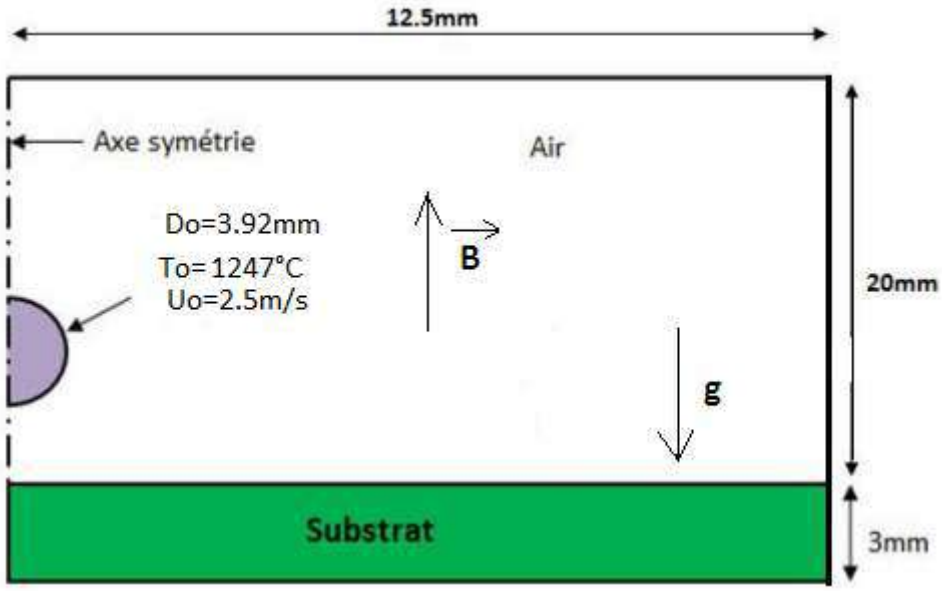


Figure IV-20: Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation

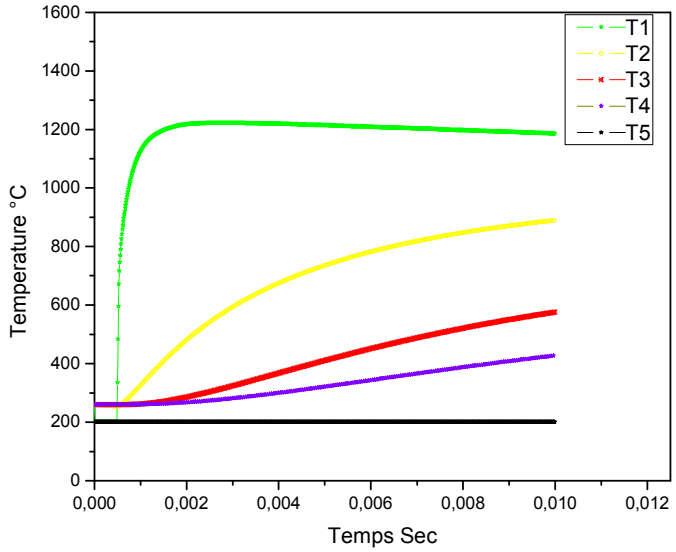


Figure IV-20: profiles de température en fonction de temps pour cinq positions dans le substrat verticalement pour le cas C.

La figure IV-20 **:** représente un comportement identique sur le substrat dès le moment de l'impact jusqu'à la fin d'étalement, on note cependant un comportement relativement similaire dans l'allure de variation, mais la valeur de température pour le point de contact est plus élevées par rapport aux autres point qui le suit.

- la température au point d'impact égale à 1247°c puis reste quasi-constante.
- Au dessous de point d'impact la température diminue.
- en éloignant de ce dernier, la température reste quasi- constante T=200 °c.

➢ **Troisième expérience :**

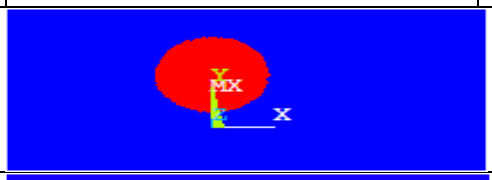
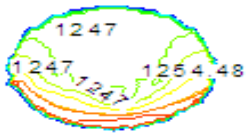
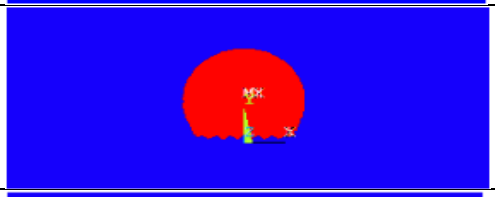
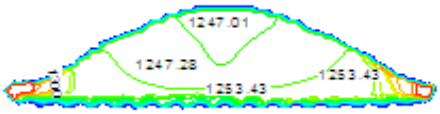
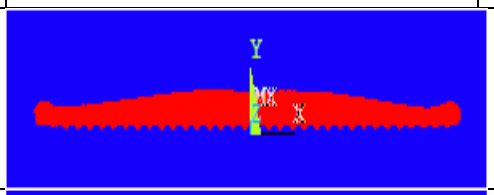
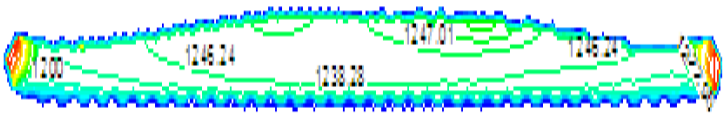
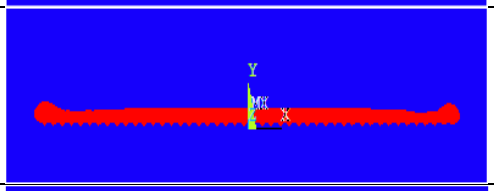
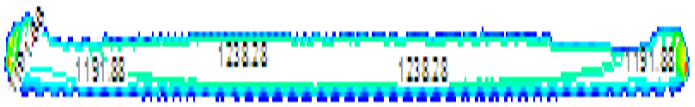
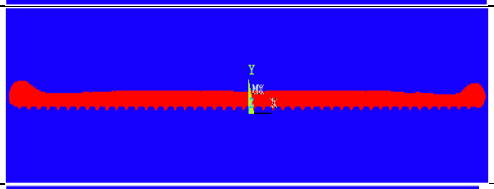
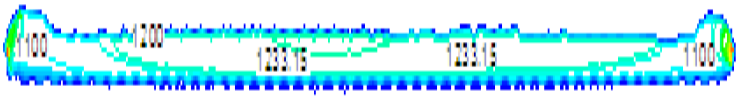
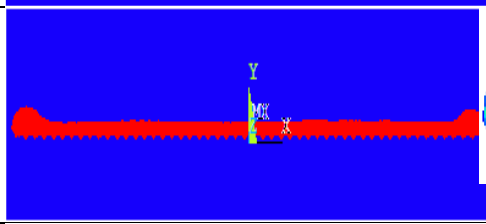
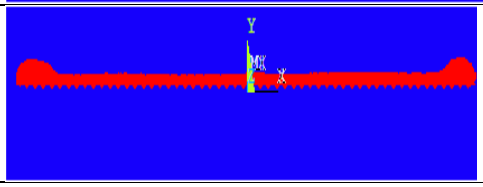
Temps	Volume fraction	Température
0.27 ms		
0.72 ms		
1.2 ms		
2.8 ms		
4.6 ms		
5.1 ms		
6.1 ms		
8.1 ms		

Tableau IV-M 7: les résultats de l'étalement de goutte du troisième cas.

Ce Tableau IV-M 7 représente la distribution de température pendant l'impact de la gouttelette. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observé que les extrémités de lamelle enregistre un retard de refroidissement et de solidification, Ceci est dû au flux radial et à la viscosité de nickel. De plus on a obtenu un bon étalement par rapport au cas précédent (étalement sans éclaboussement).

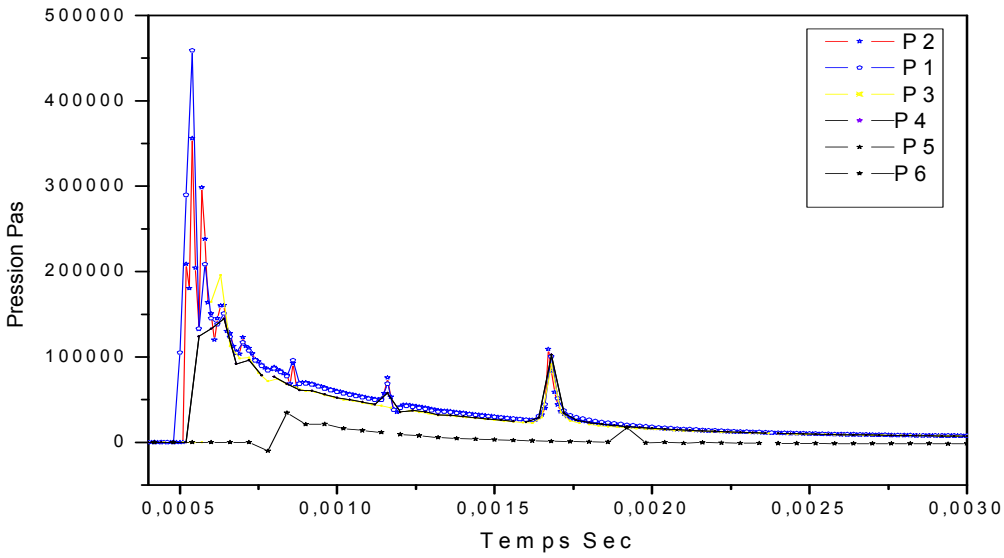


Figure IV-21: la variation dans le temps de la pression d'impact à l'interface Particule/substrat cas 3.

La Figure IV-21: on représente la variation de la pression dans le substrat, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression (460KPas), cette pression est plus grande par rapport aux deux cas précédents.

On peut dire donc que le champ magnétique est plus efficace pour l'amélioration de l'adhérence de lamelle.

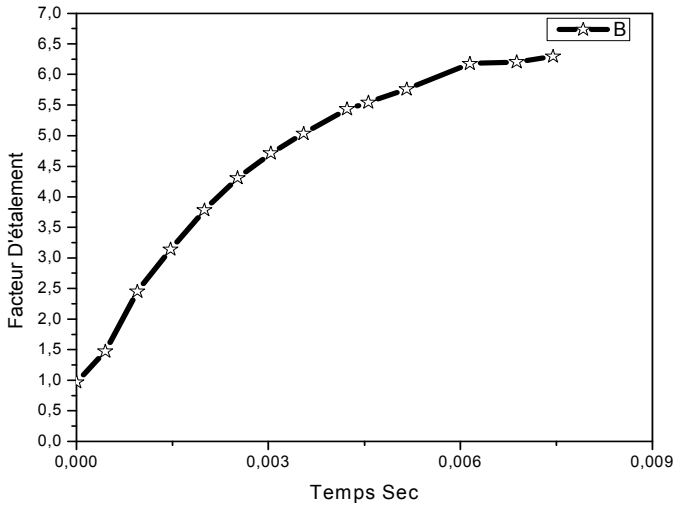


Figure IV-22: Facteur d'impact pour le 3*ème* cas

D'après la Figure IV-22**:** Facteur d'impact pour le 3è*me* cas 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=6ms la goutte se stabilise à la valeur de 6 et prend la forme de l'étalement finale On peut voir clairement l'effet de champ magnétique qui a amélioré l'étalement de lamelle.

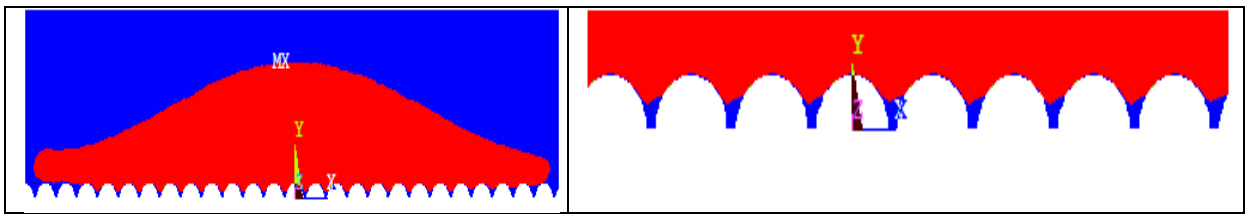


Tableau IV-M 8:Montre L'influence de la topographie substrat sur l'accrochage de goutte.

D'après le Tableau IV-M 8 de l'influence de la topographie du substrat sur l'étalement de goutte on note que l'étalement et presque parfait et les aspérités sont remplis d'une manière concave se qui favorise le bon accrochage mécanique.

IV.9. Comparaison des facteurs d'étalements pour chaque cas :

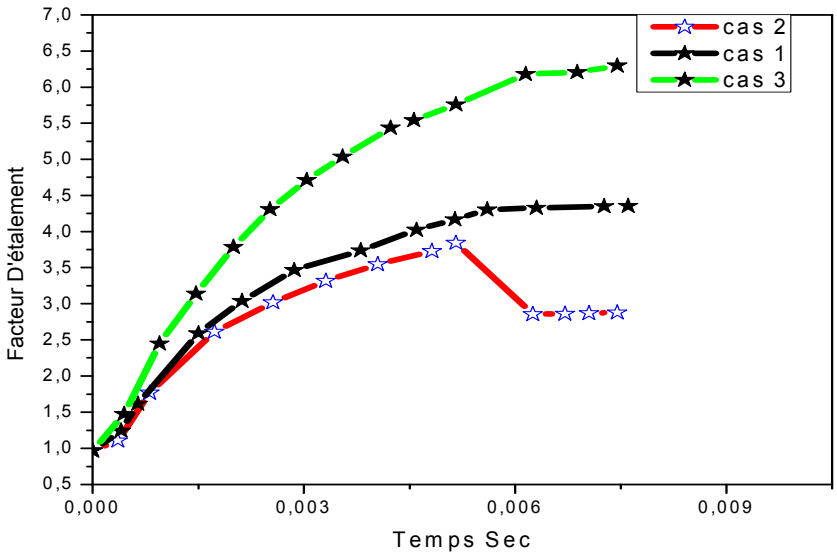


Figure IV-23 : Comparaison entre les facteurs d'étalement pour les trois cas.

La Figure IV-23 : représente une comparaison entre les facteurs d'étalement des trois cas où on peut note que :

- Dans le premier cas: le facteur d'étalement commence de 0.96 et atteint le 4.35 et reste constant.
- Dans le deuxième cas : le facteur d'étalement arrive jusqu'à3.85 puis il rechute a2.89 et reste constant.
- Dans le troisième cas: le facteur d'étalement arrive jusqu'à 6.29 et reste constant.

Donc on remarque que le champ magnétique affecte directement sur le facteur d'étalement tel que la variation de cette valeur provoque l'augmentation de facteur d'étalement comme le montre la figure IV-23.

Conclusion :

Les simulations sont effectuées en 2D cartésien. La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre un ensemble d'équations régissant l'impact des particules de nickel sur une surface rugueuse. La méthode VOF doit suivre la déformation de la surface libre. Ce

modèle est utilisé pour étudier l'impact des particules de nickel fondues sur un substrat en acier inoxydable. Le modèle est en bon accord avec l'expérience et les données numériques précédentes. Selon les simulations numériques, ce modèle a montré que:

- Les valeurs de la résistance thermique des gouttelettes sur un substrat à revêtir ont une importance cruciale dans les simulations de l'impact du métal fondu des gouttelettes.

- La qualité de la surface exploite une partie de l'étalement de la plaque et que nous avons adopté le meilleur étalement pour le **cas3**.

- La présence et l'augmentation de champ magnétique affecte directement sur l'étalement de gouttelettes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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 peut cite : le nickel; est un matériau fortement utilisé pour la fabrication de plus de 300 000 produits repartis entre les secteurs industriels, militaires, des transports, de la marine ,de l'architecture et des produits destinés au public.

Dans le premier chapitre, on a étudié la projection thermique, les paramètres et les caractéristiques, avec un état de l'art sur le sujet de l'impact d'une goutte sur substrat. Les phénomènes hydrodynamiques et thermiques qui interviennent dans le comportement d'une particule fluide isolée qui sont nombreux et suscitent encore de nos jours des interrogations. 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 les simulations sont réalisées en 2D cartésien afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, les résultats obtenus montrent que :

- La pression au point d'impact augmente rapidement dès le contact goutte substrat puis elle tend vers zéro au cours de l'étalement (pression de la goutte faible).
- La température pour le point de contact est plus élevée par rapport aux autres points dans le substrat.
- Le champ magnétique influe d'une manière directe sur le facteur d'étalement.

- La forme de la rugosité du substrat influence sur la formation de lamelle.

- Les valeurs de la résistance thermique des gouttelettes sur un substrat à revêtir ont une importance cruciale dans les simulations de l'impact du métal fondu des gouttelettes.
- La présence et l'augmentation de champ magnétique affecte directement sur l'étalement de gouttelettes.

Références

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

[2]: 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.

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

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

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

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

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

Romandes, Lausanne, 1998.

[9]: 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.

[10]: 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.

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

[12]: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

[13]: 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.

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

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

[16]: 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.

[17]: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).

[18] : 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.

[19]: 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.

[20]: 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.

[21]: 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

[22]: 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.

[23]: 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.

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

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

[26]: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

[27]: 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.

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

[29]: 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

[30]: 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.

[31]: 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.

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

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

[34]: 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.

[35] : 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.

[36]: 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.

[37]: 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.

[38]: 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.

[39]: 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.

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

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

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

[43]: A. Vardelle, P. Fauchais, N.J. Themelis, 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.

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

[45]: 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).

[46]: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.

[47]: 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.

[48]: 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.

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

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

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

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

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

[54]: S. Amada, H. Yamada, Introduction of Fractal Dimension to Adhesive Strength Evaluation of Plasma Sprayed Coating, Surface and Coating of Technology, 78, 1993, pp50-55. **[55]:** M.P. Planche, R. Bolot, C. Coddet, In-Flight Characteristics of Plasma Spraye Alumina Particles: Measurements, Modeling, and Comparison, Thermal Spray Technology, Vol. 12 (No.1), 2003, pp101-111.

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

[57]: 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-

[58]: 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.

[59]: 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.

[60] : 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.

[61] : 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

[62]: 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.

[63]: 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.

[64] :R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S. Chandra, M. Charmchi (2003) JThermSprayTechnol 12:53.

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

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

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

[68]: Tahar Souad, And others, Numerical simulation EF/VOF to study the influence of the surface condition of the formation of the slats of a nickel deposit produced by plasma spraying, Annales de Chimie - Science des Matériaux, Volume 42 – n° 2, Algeria, 2018pp

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

[70] : 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

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

[72] : F. Ben ettouil(2008)" Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc" thèse de doctorat à Université de Limoges.

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

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

[75] V.R.Voller,**C.R.Swaminathan**,and **B.G.Thomas**.(1990)Fixed grid techniques for phase change problems :Areview.Numerical Heat transfer Part B,17 :155-169.

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

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

[78]: B. Ramaswamy & M. Kawahara. Lagrangian finite element analysis applied to viscous free surface fluid flow. Int. J. Numer. Methods fluids, vol.7, p. 953-984, 1987.

.

[79]: Ghafouri-Azar R., Shakeri S., Chandra S., and Mostaghimi J., (2002) "Numerical Simulation of Offset Deposition for Sequential Tin Droplets", Proc. of Int. Thermal Spray Conference Essen, E. Lugscheider (ed.), DVS Düsseldorf, Germany, pp. 972-978.

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

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

[82]: F. H. Harlow and J. E. Welsh**.**" Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow with free surface". Phys. Fluids, 8 :2182-2189, 1965.

[83]: F. H. Harlow and J. P. Shannon. " The splash of a liquid drop". J. Appl. Phys, 38 (10) :38553866, 1967.

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

[85] : Herve OUDIN "Méthode de éléments finis " centrale Nantes ;2008

[86]: MATENE ELHACENE, (méthode numérique de résolution des équations de Navier stokes) Diplôme d'ingénieur d'état en génie climatique

[87] : Les sites :

* http://www.google.moulage.dz.

*http://www.google.moulagesouspression.fr.

*http://www.google. défauts de moulage.fr.

*http://www.google.transfert de chaleur .convection.fr

*http://www.google.méthode volume of fluide.fr

*http://www.google.les méthodes numériques.dz.

[88] :O. Pironneau: "Méthodes des éléments finis pour les fluides", Masson (1988)

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

[90] :M. Xue , Y. Heichal , S. Chandra , J. Mostaghimi.(2006)" Modeling the impact of a molten
metal droplet on a solid surface using variable interfacial thermal contact resistance" J Mater Sci (2007) 42:9–18, DOI 10.1007/s10853-006-1129-x, Springer Science+Business Media, LLC 2006