République Algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Yahia Fares de Médéa

Faculté de technologie

Département de génie mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE ET THERMIQUE DES SYSTEMES

Thème:

L'impact oblique et simultané des particules d'alumine sur substrat d'acier.

Présenté par: Mlle. Samiha DEIA
Mlle. Amina RABAH BELHAOUARI

Dirigé par: Dr. Mounir.ZIRARI

Promotion 2016-2017

Résumé:

Le travail que nous avons effectué consiste en l'étude de la projection plasma d'une particule d'aluminium sur un substrat en acier destinée à un revêtement. Le problème étudié a été cerné par différentes hypothèses d'impact particule/substrat que nous avons pu simuler sur le logiciel multi physique « ANSYS v.11 » et dont les résultats obtenus sont très concluants.

A travers cette étude nous avons pu démontrer l'influence des paramètres thermo-physiques de la goutte et du substrat sur la qualité du revêtement ainsi que l'influence de la présence d'air au sein de la goutte sur celui-ci, puis nous avons tenté une nouvelle approche physique qui est le jet de plasma en oblique afin de voir l'effet qu'à cette façon de pratiquer le revêtement sur sa réalisation.

Mots clés: Dépôt, lamelle, oblique, simulation, substrat, vof, changement de phase, éléments finis, chaleur spécifique équivalente, air.

Abstract:

The work we have carried out consists in the study of the plasma projection of an aluminum particle on a steel substrate intended for a coating. The problem studied was identified by different hypotheses of particle / substrate impact that we were able to simulate on the multiphysics software «ANSYS v.11» and whose results obtained are very conclusive.

Through this study we have been able to demonstrate the influence of the thermo-physical parameters of the drop and the substrate on the quality of the coating as well as the influence of the presence of air within the drop on it and then We attempted a new physical approach which is the plasma jet oblique in order to see the effect that this way of practicing the coating on its realization.

Key words: Deposit, slide, oblique, simulation, substrate, vof, phase change, finite elements, equivalent specific heat, air.

الخلاصة:

في هذا العمل قمنا بدراسة رش البلازما لجريئة الالومنيوم على صفيحة من الفولاذ قصد القيام بتلبيسها.

هذه الدراسة محاطة بعدة فرضيات حول تأثير الجزيئات على الركيزة والتي يمكن محاكاتها عن طريق برمجية Ansys.v11 التي تقودنا إلى نتائج جد دقيقة.

من خلال هذه الدراسة أثبتنا تأثير العوامل الحرارية والفيزيائية للقطرة والصفيحة على جودة التلبيس بالإضافة الى تأثير الهواء داخل القطرة كما درسنا تقريب فيزيائي جديد والمتمثل في رشة البلازما بزاوية ميلان قصد معرفة تأثير هذه الوضعية على التلبيس.

الكلمات المفتاحية الصفيحة، منحرف،المحاكاة، الركيزة ، تغيير المرحلة، عنصر محدود، عنصر محدود الحرارة، النوعية، هواء.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr : (M.Zirari), son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous ceux qui, à un moment ou un autre, nous ont apporté leur savoir faire, en particulier Mohamed Amine Ounnar.

LISTES DES FIGURES

INRODUCTION GENERALE **1**

CHAPITRE I : ETUDE BIBIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction **2**

I.2 Définition de la projection thermique **2**

I.3 Principe de base **2**

I.4 Différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie **4**

I.5 Les principaux types de projection thermique **5**

I.5.1 La projection par flamme 5

I.5.2 La projection par arc électrique 8

I.6 Description du procédé **12**

I.6.1 L'arc électrique 13

I.6.2 L'écoulement du jet de plasma 15

I.6.3 Les gaz plasmagènes 16

I.6.4 Distance de tir 18

I.6.5 Vitesse de l'écoulement 19

I.6.6 Transfert de chaleur plasma-particules 19

I.6.7 Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat 20

I.6.8 Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat 21

I.6.9 Etalement de la particule 22

I.6.10 Solidification des lamelles 24

I.6.11 Caractéristiques microstructurales des revêtements 25

I.6.12 Dépôts d'alumine 26

I.6.13 Substrat 27

I.6.13.1 Préparation de substrat 27

I.6.13.2 Construction du dépôt 28

I.7 Conclusion **29**

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction **30**

II.2 Modèle dynamique **29**

II.2.1 Modélisation de l'écoulement des fluides 30

II.2.1.1 L'équation de la continuité 31

II.2.1.2 L'équation de quantité de mouvement 31

II.2.1.3. Équation de l'énergie 31

II.2.2 Modélisation bi phasique liquide/solide 32

II.3 Modèle thermique **32**

II.3.1 Transfert de chaleur avec changement de phase 33

II.3.1.1 Méthode à grille mobile 33

II.3.1.2 Méthode à grille fixe 34

II.3.2 Modèle thermique utilisé 36

II.4 Calcul d'interfaces **36**

II.4.1 Les méthodes de suivi de front 37

II.4.2 Les méthodes de suivi de volume 38

II.4.3 La Méthode VOF CIAM 39

II.5 Conclusion **41**

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

III.1 Introduction **42**

III.2 Discrétisation des équations **42**

III.3 Résolution des équations par éléments finis **44**

III.3.1 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis 47
III.3.1.1 Formulation variationnelle forte 47
III.3.1.2 Formulation variationelle faible 47
III.3.2 Forme généralisée des équations du système et discrétisation..... 48
III.3.3 Terme temporel 49
III.3.4 Terme d'advection 50
III.3.4.1 Monotone Streamline Upwind Approach (MSU) 50
III.3.4.2 Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin) 52
III.3.4.3 Approche Colloquée De Galerkin (COLG)..... 52
III.3.5 Terme de Diffusion 53
III.3.6 Termes source..... 53

III.4 Conclusion 54

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction 55

IV.2 Description du progiciel « ANSYS 11».....56
IV.2.1 Présentation du progiciel 56
IV.2.2 Les avantage du progiciel ANSYS 56
IV.2.3 Etapes nécessaires à la simulation d'un problème physique 56
IV.2.4 Schéma de logiciel ANSYS..... 57

IV.3 Description du domaine d'application.....58

IV.4 Les dimensions de la géométrie 58

IV.5 Matériaux utilisé.....58
IV.5.1 Matériaux utilisé (particule d'impact) 59
IV.5.1.1 Propriétés de l'aluminium à l'état pur..... 59
IV.5.1.2 Avantages de l'aluminium..... 60

IV.5.1.3 Domaines d'utilisation 60
IV.5.2 Le matériau revêtu (le substrat) 60
IV.5.2.1 Propriétés à l'état pur de l'acier 60
IV.5.2.2 Domaines d'utilisations 61
IV.5.2.3 Avantage d'utilisation de l'acier 61
IV.5.3 Les propriétés des mâtereaux utilisés dans notre simulation 62
IV.6 Identification du problème 63
IV.7 Exposition des résultats de la simulation 70
IV.7.1 Pour un taux de présence d'air à 0% 70
IV.7.2 Pour une goutte d'aluminium avec un taux de présence d'air à 25% . 73
IV.7.3 Pour un taux de présence d'air à 50% 76
IV.7.4 Pour un taux de refroidissement à 75% 78
IV.7.5 Comparaison des résultats pour les différents taux de présence d'air (0% - 25% - 50% -75%) 82
IV.8 Conclusion 95

Chapitre I

Figure I.1: Principe de base de la projection thermique 2

Figure I.2: Les différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie 3

Figure I.3: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil 5

Figure I.4: Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme- poudre 5

Figure I.5: Principe de fonctionnement d'un canon à détonation 6

Figure I.6: Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu 7

Figure I.7: Principe de fonctionnement d'un pistolet arc-fil 8

Figure I.8: Schéma du principe de la projection par plasma d'arc 9

Figure I.9: Torche à plasma à écoulement laminaire (E électrode, T tuyère) 10

Figure I.10: torche à plasma à écoulement en vortex 11

Figure I.11: Principe de fonctionnement d'une torche plasma 12

Figure I.12: Représentation des différentes zones de développement de l'arc électrique selon M.P. Planche 12

Figure I.13: Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc 14

Figure I. 14: Description schématique du processus d'engouffrement 15

Figure I.15: Propriétés des principaux gaz plasmagènes utilisés en projection plasma 16

Figure I.16: Influence de l'intensité sur la vitesse maximale du gaz à 4 mm en sortie de tuyère 17

Figure I.17: Schématisation du transfert de chaleur plasma- partic 19

Figure I.18: Modes d'impact 21

Figure I.19: Schéma d'écrasement de la particule 21

Figure I.20: Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma 24

Figure I.21: Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) du dépôt d'alumine élaboré à 573 K. 25

Figure I.22: Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique 27

LISTES DES FIGURES

Chapitre II

Figure II.1: Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon 29

Figure II.2: Répartition des phases pour trois problèmes biphasiques 31

Figure II.3: Évolution de l'enthalpie en fonction de la température 34

Figure II.4: Présentation des méthodes de calcul d'interface 36

Figure II.5: Différentes méthodes de suivi de front 37

Figure II.6: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque 38

Figure II.7: Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret 38

Figure II.8: Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique 39

Chapitre III

Figure III.1: Méthode de discrétisations 42

Figure III.2: Organisation générale d'un code de calcul 45

Figure III .3: Approche de ligne de courant d'Upwind 50

Chapitre IV

Figure IV.1: Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS 56

Figure IV.2: représentation des dimensions de la géométrie étudiée 57

Figure IV.3: Configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification 62

Figure IV.4**:** Le maillage d'une particule en aluminium dans un jet plasma et projetées sur……

un substrat 63

Figure IV.5: Impact d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C 64

La figure IV.6: Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat a 200°C 65

Figure IV.7: Facteurs d'étalement.....66

Figure IV.8: représentation des dimensions des deux géométries étudiées 67

Figure IV.9**:** le maillage de deux particules en aluminium sur un substrat en acier 68

Figure IV.10: Points de capture des températures.....68

LISTES DES FIGURES

Figure IV.11: Point de capture de la pression 68

Figure IV.12**:** La variation de la pression au point d'impact (particule/substrat) en fonction de temps pour la présence de 0 % d'air. 69

Figure: IV.13: Profiles de température en fonction du temps pour la présence de 0 % d'air Pour sept positions dans le substrat 70

Figure : IV.14: distribution de la température lors de l'impact de la goutte avec un taux de présence d'air à 0% 71

Figure IV.15**:** profiles de température en fonction de temps dans le cas de 25 % d'air..... ...72

Figure IV.16: La variation de la pression au point d'impact (particule/substrat) en fonction de temps dans le cas 25 % 73

Figure IV.17: la dynamique de la particule au cours d'étalement 74

Figure IV.18**:** la thermique de la particule au cours d'étalement 74

Figure IV.19**:** profile de température en fonction de temps dans le cas de 50 % d'air 75

Figure IV.20**:** la variation de la pression au point d'impact en fonction de temps Dans le cas 50% de présence d'air. 76

Figure IV.21: la dynamique de la particule au cours d'étalement à 50**%** 77

Figure IV.22: la thermique de la particule au cours d'étalement à 50**%** 77

Figure IV.23**:** profile de température en fonction de temps dans le cas de 75 % d'air 78

Figure IV.24**:** la variation de la pression au point d'impact en fonction de temps dans le cas 75% d'air. 79

Figure IV.25**:** la dynamique de la particule au cours d'étalement à 75% 80

Figure IV.26**:** la thermique de la particule au cours d'étalement à 75% 80

Figure IV.27**:** Comparaison entre les profiles de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas de présence d'air 81

Figure IV.28**:** Comparaison de la variation de la pression Pour les quatre cas de présence d'air 82

Figure IV.29: Comparaison entre les 4 cas de taux de présence d'air 83

Figure IV.30**:** représentation des dimensions de géométrie étudiée 85

Figure IV.31: Schéma représente de l'étalement pour α=5° à t = 7ms 86

Figure IV.32: profiles de température en fonction de temps Pour α = 5° 86

LISTES DES FIGURES

Figure IV.33: variation de pression en fonction de temps Pour α = 5° 87

Figure IV.34: Schéma représente de l'étalement pour α=70.4° a t = 7ms 87

Figure IV.35**:** Profiles de température en fonction de temps Pour α = 7.4° 88

Figure IV.36: Variation de pression en fonction de temps Pour α = 7.4° 88

Figure IV.37: Schéma représente de l'étalement pour α =9.1° à t = 7ms 89

Figure IV.38: Variation de pression en fonction de temps Pour α = 9.1° 89

Figure IV.39: Profiles de température en fonction de temps Pour α = 9.1° 90

Figure IV.40: Comparaison entre les profiles de température pour les trois angles 91

Figure IV.41: Comparaison entre la variation de pression pour les 3 angles 92

Figure IV.42: Comparaison entre les trois angles 93

Figure IV.43: Comparaison pour les trois angles de projection oblique 94

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I-1: Propriétés de dépôts de NiCrAlY réalisés sous air à des distances de tir de 100mm et 150mm (250A, 38V) 18

Tableau III.1: Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables) 47

Tableau IV.1: propriété physiques de l'aluminium 58

Tableau IV.2: propriété mécanique de l'aluminium.....59

Tableau IV.3: propriété thermo-physique de l'acier 61

Tableau IV.4: Prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés 62

Tableau IV.5: Les conditions initiales d'étalement de L'identification 63

Tableau IV.6: Les conditions initiales pour le Rrefroidissement de la particule……...68

Tableau IV.7**:** Comparaison des profiles de température des quatre cas pour pourcentage d'air ……85

Tableau IV.8: représentation les variations des vitesses étudiée …….....87

NOMENCLATURE

Lettres latines

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

NOMENCLATURE

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

Lettres grecques

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

Abbreviation

APS	Atmospheric Plasma Spraying
HVOF	High Velocity Oxyfuel Flame
CIAM	Construction de l'Interface Affine par Morceaux
CL	Condition aux Limites

EF	Elément Finis
TVD	Total Variation Diminishing
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluide)
MSU	Monotone Streamline Upwind Approach
SUPG	Stream line Upwind/Petro-Galerkin
COLG	Approche Colloquée De Galerkin
2D	Deux Dimensions

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, le revêtement des objets et des pièces fut la solution de choix afin de protéger ces derniers contre toute agression des phénomènes physiques tels que la corrosion et l'érosion mais aussi les hautes températures. Longtemps utilisé dans l'industrie de pointe, ce dernier a su montrer son intérêt et son efficacité à accomplir la tache qui lui a été confiée et qui n'est autre que la protection des objets couteux

Cependant, comme le revêtement est une opération extrêmement onéreuse, nous ne pouvons pas nous permettre de gaspiller de la matière inutilement sans réussir à réaliser celui-ci, c'est pourquoi nous devons nous tourner vers de nouvelles méthodes mathématiques et numériques afin de bien cibler les paramètres qui entrent en jeu et contrôlent le phénomène de revêtement et qui par la détermination des valeurs fiables et exactes de ces derniers le revêtement réalisé dans les mêmes conditions sur lesquelles le calcul fut basé, sera sans aucun doute un succès des le premier coup ce qui engendrera un gain en terme de coup , de temps et de matière.

Le but de notre travail est d'étudier un revêtement de substrat d'acier avec une particule en aluminium, cette étude fait l'objet de plusieurs hypothèses concernant les conditions physiques de réalisation du revêtement et dont les résultats seront discutés en fin de travail.

Dans une première partie une recherche bibliographique sur les jets de plasmas destinés au revêtement puis nous allons poursuivre dans une deuxième partie avec la modélisation mathématique des problèmes physiques afin de comprendre la logique des calculs que nous allons entreprendre pour la réalisation de ce travail, aussi dans une troisième partie nous allons parler de la modélisation numérique qui nous aidera à simuler notre problème dans un logiciel informatique et enfin dans une quatrième et dernière partie on exposera les résultats obtenus via la simulation numérique effectuée avec le logiciel multi physique ANSYS v.11 ainsi on pourra déduire l'influence de chaque paramètre physique sur le revêtement.

CHAPITRE I:

ETUDE BIBIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Ce chapitre est basé sur l'étude bibliographique de la projection thermique, en représentant les applications des matériaux et les techniques d'élaboration des dépôts constitués 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.2 Définition de la projection thermique

La projection thermique est une procédé qui permet de réaliser rapidement des dépôts épais (jusqu'à des épaisseurs millimétriques), sur de grandes surfaces et pour un coût acceptable. Les applications industrielles majeures concernent les industries aéronautiques, navales, automobiles, biomédicales, mécaniques… etc. [1]

I.3 Principe de base

Tous les systèmes de projection thermique possèdent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter jusqu'au substrat de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) qui peuvent être à l'état liquide, pâteux voire solide. Ce gaz vecteur peut être aussi source enthalpique, permettant de chauffer ces particules jusqu'au point de fusion.

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

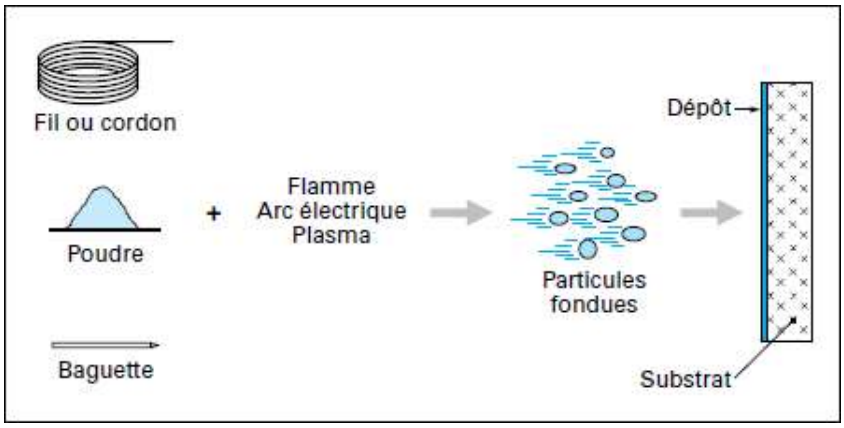


Figure I.1: Principe de base de la projection thermique [2].

La Figure I.1 présente le principe général de la projection thermique: la matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (arc électrique, flamme, plasma). Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir. En principe, tout matériau dont la température de fusion d'au moins 300 °C de la température de décomposition ou de vaporisation peut être projetée et le substrat peut être maintenu à une température inférieure à 150 °C pendant l'opération de déposition. L'épaisseur du dépôt constitué par l'empilement de lamelles est généralement comprise entre 50 µm et quelques millimètres [2].

I.4 Différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie

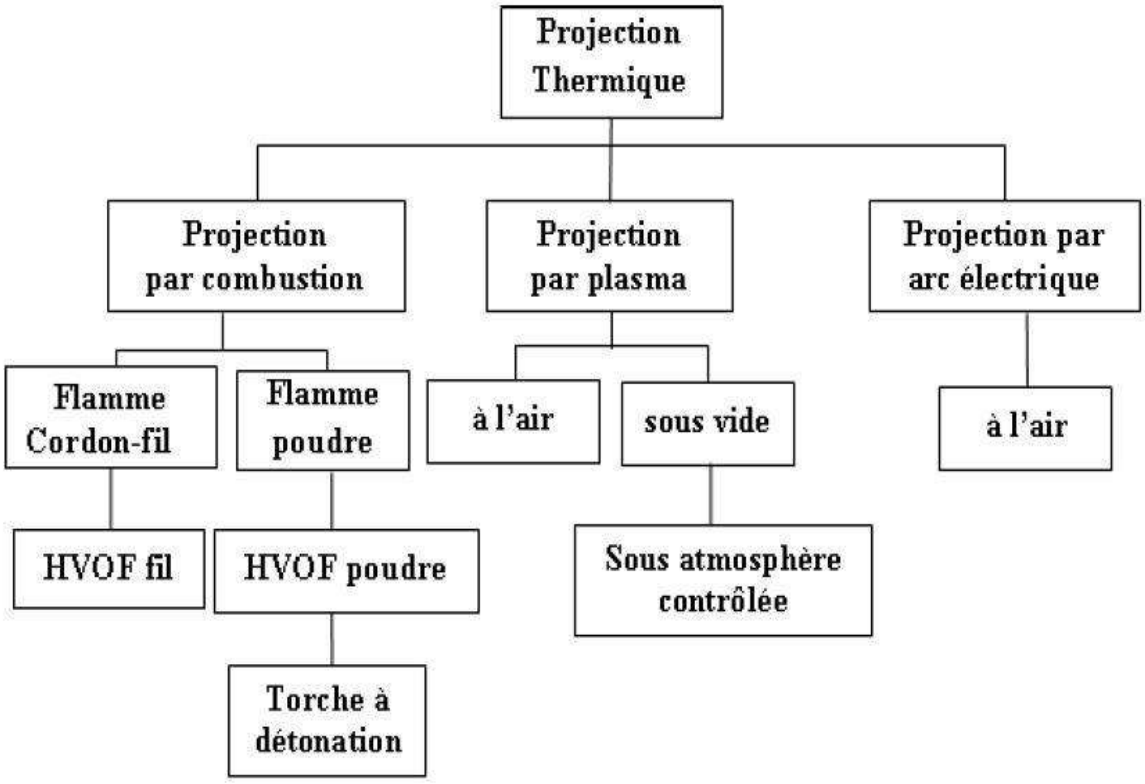


Figure I.2: Les différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie [5].

I.5 Les principaux types de projection thermique

Il existe de nombreuses manières de réaliser la projection thermique mais les plus couramment utilisées dans l'industrie sont la projection par chalumeau, par arc fil, par flamme supersonique et par plasma d'arc soufflé. L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention du Schoop portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur [1] puis le plomb à poudre à travers une flamme. Les applications industrielles ont débuté en 1914, d'abord dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), puis dans ceux de l'anticorrosion (dépôt d'aluminium) et de la décoration (dépôt de bronze) [2]. Ensuite, la recherche de propriétés de surface spécifiques pour des pièces utilisées dans les conditions de plus en plus sévères, en particulier dans les industries aéronautiques et mécaniques, a conduit au développement de nouveaux procédés de projection thermique (plasma, canon a détonation, flamme hypersonique (HVOF)) et de nouveaux dépôts (alliages métalliques, céramiques, composites…).

Les propriétés du dépôt dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat.

Les paramètres des particules à l'impact sont: leur vitesse, leur température, leur état de fusion, leur taille, leur état chimique. Ces derniers dépendent des caractéristiques de l'écoulement plasma et des conditions d'injection de la poudre dans celui-ci.

I.5.1 La projection par flamme

Projection par flamme utilise l'énergie d'une réaction chimique, ce type est simple et moins couteuse, les matériaux dont la température de fusion est inférieure à 2300 °C, peuvent être projetés par cette technique.

Il existe trois procédés: la projection flamme-fil, la projection flamme-poudre et la projection par flamme hypersonique.

A) La projection par flamme-fil

La flamme est uniquement utilisée pour tendre le matériau d'abord, introduit sous forme de fil, de barreau ou de cordon en son centre (Figure I.3). La projection des gouttelettes sur le substrat est assurée par un jet de gaz comprimé qui atomise le matériau fondu. La vitesse des particules est plus élevée (environ 150m/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. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme (T_{fusion} = 0,95 T_{flamme}). Cette technique permet de projeter des métaux (Al, Cu, Ni), 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-T_iO_2, Z_rO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguette.

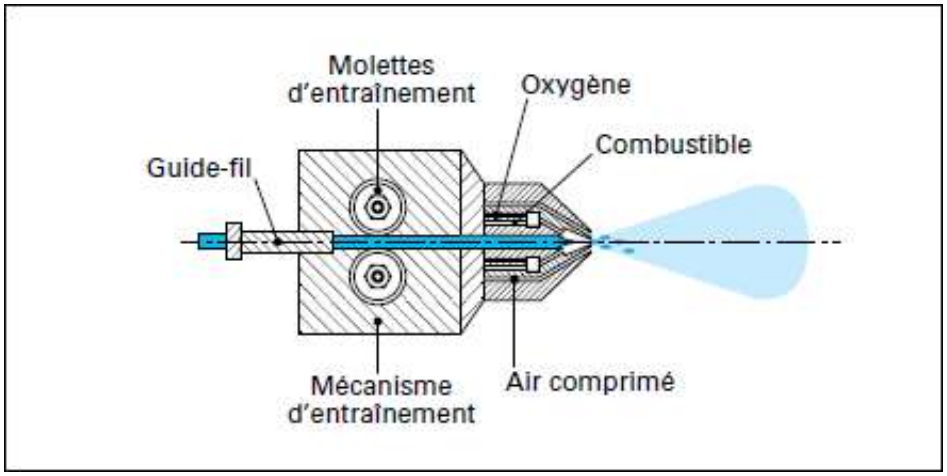


Figure I.3: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [2].

B) La projection par flamme-poudre

Elle consiste à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxycombustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par la réaction chimique entre l'oxygène et un gaz carburant de combustion (Figure I.4). La température de fusion des matériaux utilisés doit être inférieure à la température de la flamme (T_{fusion} = 0,6-0,7 T_{flamme}). En raison de la faible vitesse des particules projetées, de l'ordre de 30 à 50 m/s, les dépôts obtenus présentent généralement une faible adhérence (20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20%) par rapport aux dépôts obtenus avec d'autres techniques de projection. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudres aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondu. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques millimètres d'épaisseur, à des taux horaires d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat [3, 2].

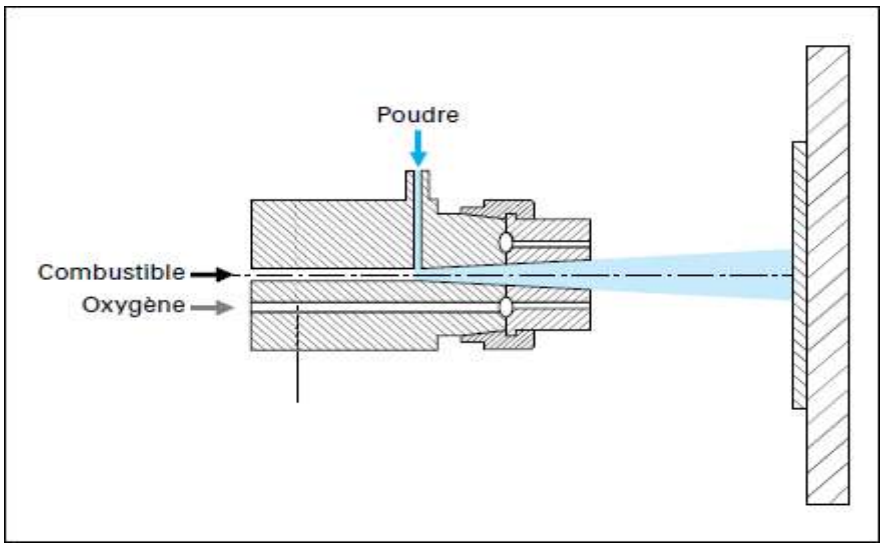


Figure I.4: Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme- poudre [2].

C) La projection par flamme hypersonique

Ce type de projection utilise la combustion sous pression d'un carburant sous forme gazeuse (propane, propylène, acétylène, hydrogène) ou liquide (kérosène) avec de l'oxygène ou éventuellement de l'air en particulier pour le kérosène. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion à des pressions allant jusqu'à 1 MPa ce qui augmente légèrement la température de combustion. La chambre est refroidie par une circulation d'eau. La flamme est ensuite accélérée dans une tuyère et acquière à la sortie de celle-ci une vitesse supersonique. La poudre à projeter est soit propulsée sous pression dans l'axe du jet (injection en amont de la tuyère) soit injectée au voisinage en aval de la tuyère à une pression proche de la pression atmosphérique. Les vitesses acquises par les particules peuvent atteindre 600 à 700 m/s et les dépôts réalisés présentent une bonne adhérence (de 70 à 100 MPa) et une faible porosité (2%). Les matériaux projetés sont essentiellement des cermets (WC-Co, Cr3C7-NiCr), des métaux, des alliages métalliques auto-fusibles ou non [4].

Deux procédés présentent ce type; la projection hypersonique à tir discontinu (canon a détonation), et celle à tir continu (HVOF).

➢ Canon a détonation

Cette technique utilise l'énergie de détonation d'un mélange généralement constitué d'oxygène et d'acétylène pour projeter les particules à déposer sur le substrat. Le matériau est introduit dans le tube qui constitue le canon à détonation, en même temps que le mélange combustible (figure I.5). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence d'environ 8 allumages par seconde. La poudre est chauffée et éjectée à très grande vitesse (600 à 900 m/s) vers le substrat par l'onde de choc créée. Entre chaque tir, le tube est balayé par un jet de gaz neutre (argon). Des températures supérieures à 3300 °C sont atteintes par

les gaz brulés suivant l'onde de choc. Ce procédé est essentiellement utilisé pour réaliser les dépôts de cermets (WC-Co, …) ou de céramique (Cr_2O_3, Al_2O_3, …).

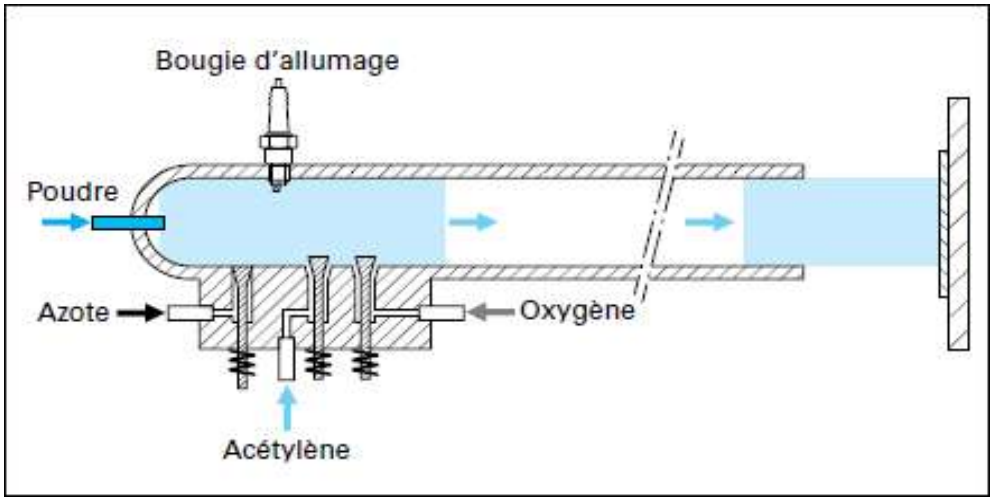


Figure I.5: Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [2].

- **Flamme oxyfuel a haute vitesse (HVOF)**

Cette technique a été développée dans les années 80. Le principe est basé sur une réaction de combustion à haute pression (5.10^5 à 7.10^5 pa) dans une chambre à combustion. Les vitesses de flamme et des particules en sortie de tuyère sont très élevées (jusqu'a 700m/s). L'HVOF utilise la combustion de l'oxygène avec un carburant comme le propane, le propylène, le tétère, l'hydrogène ou le kérosène. Un procédé comparable, (figure I.6). Ces procédés de projection sont principalement utilisés pour projeter des alliages métalliques et des carbures.

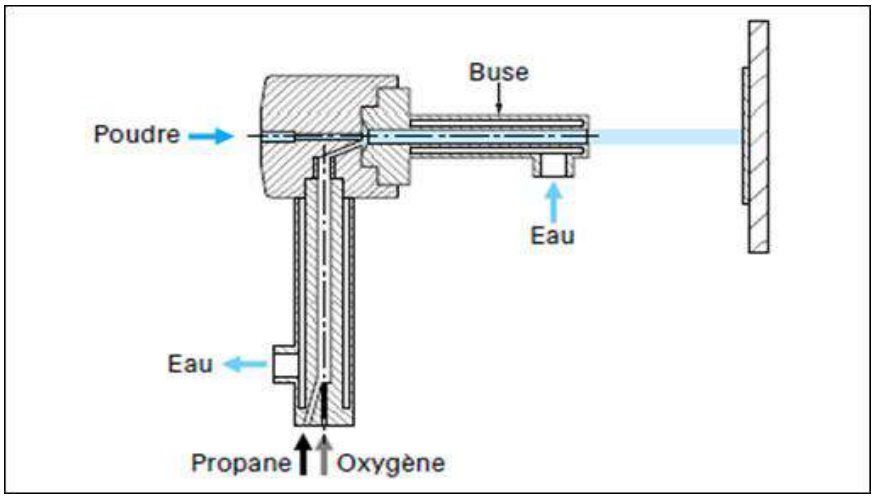


Figure I.6: Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu [2].

I.5.2 La projection par arc électrique

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

A) La projection arc-fil

Le principe de cette technique consiste à amorcer un arc électrique entre deux électrodes consommables sous forme de fil (figure I.7). La tension appliquée entre ces deux fils varie entre 18 et 40 V pour des intensités de courant comprises entre 100 et 500 A. L'arc généré fait fondre l'extrémité des fils. Une circulation de gaz comprimé (généralement de l'air) permet d'atomiser la partie fondue des fils. La température de l'arc peut dépasser 6000°K dans l'air à pression ambiante, ce qui contribue à un chauffage excessif des particules et une vaporisation importante des gouttelettes. L'utilisation d'air comprimé comme gaz d'atomisation conduit également à l'oxydation des gouttelettes métalliques surchauffées.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts épais de 0,5 à 3 mm avec une adhérence de 20 à 40 MPa. Il permet de déposer des matériaux métalliques ductiles tels que le zinc, l'aluminium ou le cuivre [4]. Mais également des superalliages non ductiles avec des qualités de dépôt comparables à celles obtenues par projection plasma, ainsi que des dépôts métalliques renforcés par des particules céramiques non fondues grâce à la technologie des fils fourrés.

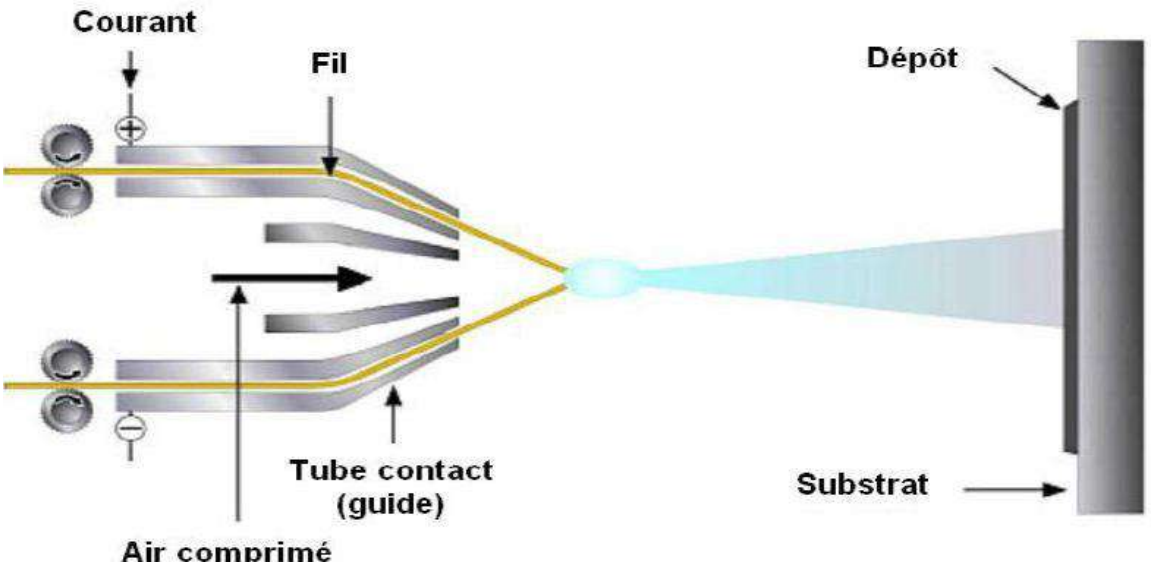


Figure I.7: Principe de fonctionnement d'un pistolet arc-fil [2].

B) La projection par plasma d'arc

Un arc électrique est initié entre la cathode thermo-émissive et la tuyère en cuivre (anode). L'arc électrique est soufflé par les gaz plasmagènes qui sont injectés en amont de la

torche entre les deux électrodes (figure I.8). Ces gaz sont ensuite chauffés (effet Joule) et partiellement ionisés, ils forment alors un écoulement de plasma en extinction en sortie de tuyère. Suivant les conditions expérimentales et le diamètre interne de la tuyère anode, la température du jet de plasma sur l'axe en sortie de tuyère varie entre 12000 à 14000K, et la vitesse d'éjection des gaz plasmagènes en sortie de tuyère sur l'axe est de 600 à 2200 m/s. Un injecteur externe ou interne permet d'introduire des particules solides dans le jet de plasma via un gaz porteur.

Ces particules, de taille comprise entre 10 et 100 µm, sont accélérées et fondues dans le jet de plasma avant d'impacter le substrat placé à 100-120 mm de la sortie de tuyère. Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des différentes particules écrasées (lamelles ou splats) et solidifiées sur le substrat [5].

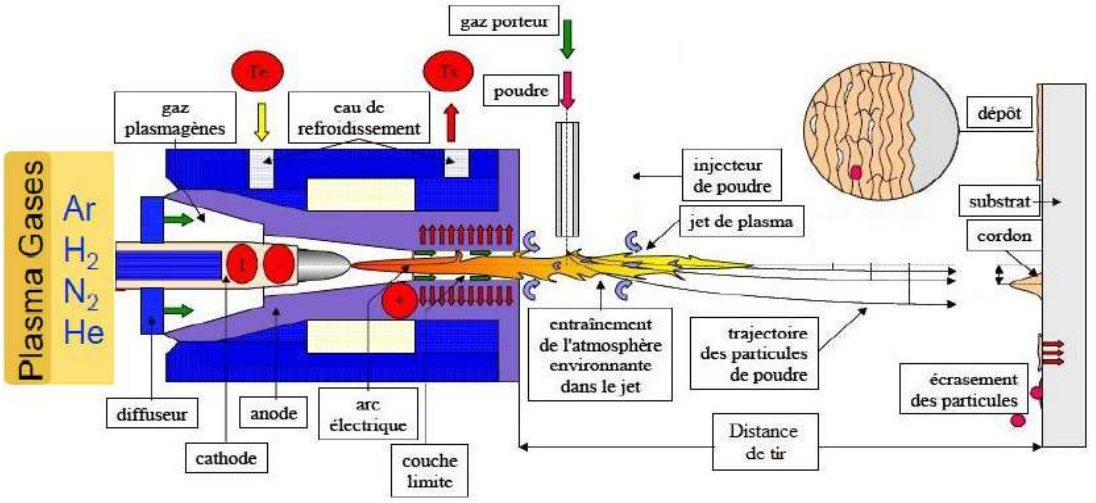


Figure I.8: Schéma du principe de la projection par plasma d'arc [5].

Le système est composé d'une torche à plasma d'arc soufflé, ce principe comporte trois éléments principaux:

- Une torche à plasma (source de chaleur).
- Un injecteur de particules céramiques (apport de matière première).
- Un substrat où se forme le dépôt.

Donc, ce procédé peut être décomposé en plusieurs étapes : la génération de la source thermique, l'injection de particules, les transferts thermique et dynamique du plasma vers les particules, puis la formation du dépôt sur le substrat.

❖ La torche

La torche à plasma ou procédé de vitrification serait un moyen possible de traitement thermique de certains déchets. Elle permettrait d'atteindre de très hautes températures (de 400°C à 2000°C), supérieures aux méthodes conventionnelles (gaz, charbon…). Ce procédé est présenté comme une alternative à l'incinération et au compostage, mais est utilisé, pour l'instant, comme un complément de l'incinération. Il rend inertes les cendres toxiques résultant de l'incinération.

- **Types de torche:**

On distingue deux types de torche selon le type d'électrode:

- Les torches à écoulement laminaire (figure I.9), équipées d'une électrode pointue en tungstène, pour les gaz non oxydants (azote, argon) ou réducteurs (hydrogène). C'est cette configuration qui est utilisée dans ce travail de thèse.

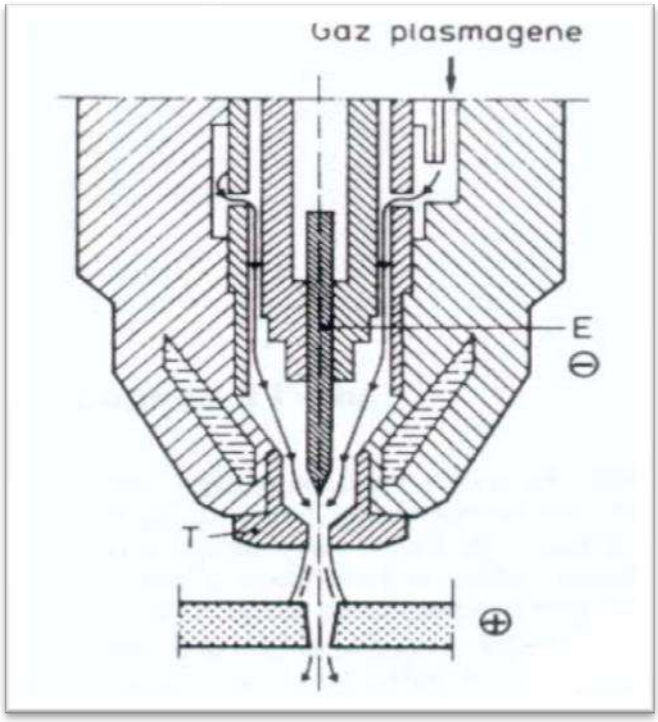


Figure I.9: Torche à plasma à écoulement laminaire (E électrode, T tuyère) [8].

- Les torches à écoulement en vortex (figure I.10) utilisant une électrode à extrémité plate. Ces torches ont été historiquement conçues pour permettre l'utilisation d'inserts émissifs à oxyde réfractaire, tels l'hafnium ou le zirconium, lorsque le gaz plasmagène est oxydant. Pour cette géométrie, l'injection de gaz plasmagène est tourbillonnaire afin de stabiliser le pied cathodique de l'arc, ce qui limite l'oxydation et la destruction rapide de l'électrode [8].

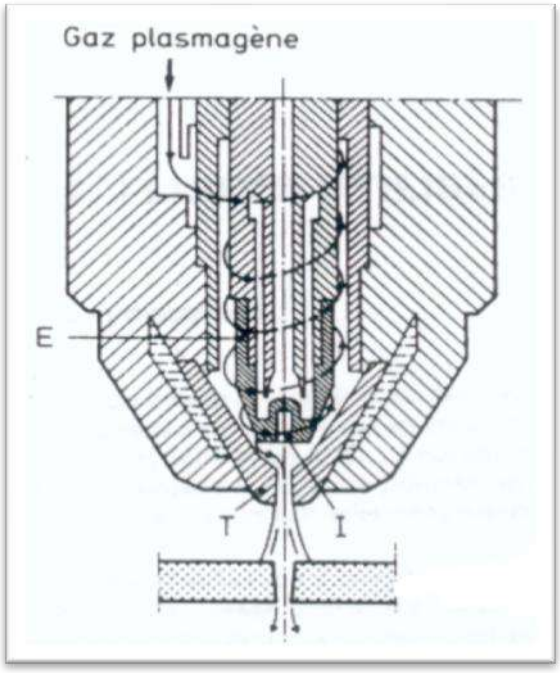


Figure I.10**:** torche à plasma à écoulement en vortex (I insert) [8].

I.6 Description du procédé

Les cendres, récoltées après incinération, sont introduites dans un four où elles sont soumises au flux thermique de la torche à plasma. La torche à plasma est un brûleur qui génère un flux thermique, sans flammes, sous forme d'un plasma (fluide composé de molécules gazeuses, d'ions et d'électrons). L'air atmosphérique traverse un arc électrique qui éclate en continu entre deux électrodes. Le flux thermique porte la température des déchets au-dessus du point de fusion d'une partie des constituants et au-dessus du point de gazéification des autres constituants. La partie fondue des déchets est extraite à la base du réacteur et est généralement refroidie brutalement dans un bain d'eau. C'est par ce passage d'une très haute température à une basse température que s'opère la vitrification. Le vitrificat qui est un solide obtenu par refroidissement d'un liquide surfondu s'apparente à un verre grossier ou au basalte. Il pourra être stocké en décharge de classe III ou être utilisé comme matériau de remblai ou comme agrégat pour la fabrication de dalles de sol. Le gaz combustible, qui contient certains polluants, doit être épuré, et peut être ensuite utilisé comme combustible dans une turbine à gaz qui entraîne un premier turboalternateur (moteur) [2].

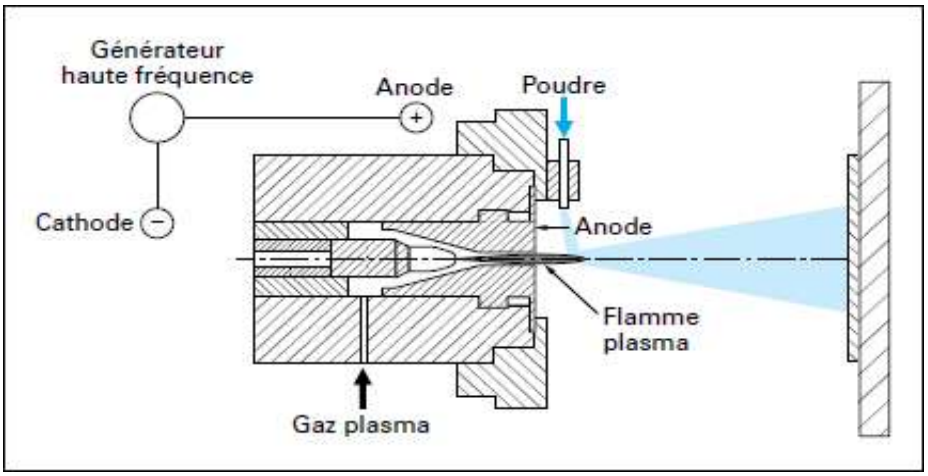


Figure I.11: Principe de fonctionnement d'une torche plasma [2].

I.6.1 L'arc électrique

Le développement de l'arc entre les électrodes peut être décrit en plusieurs zones, présentées sur la figure I.12 [9]

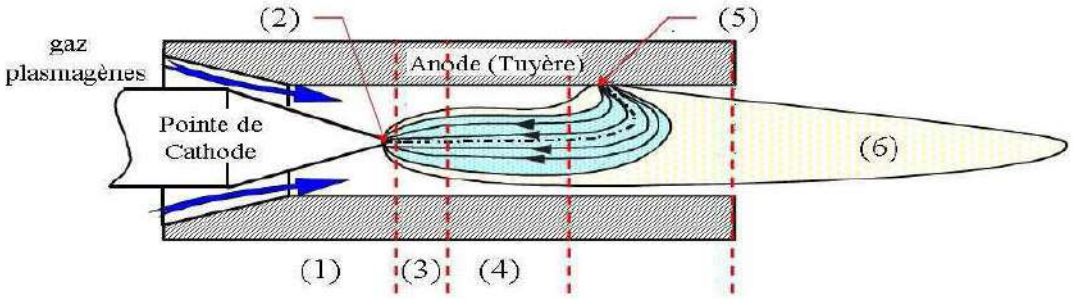


Figure I.12: Représentation des différentes zones de développement de l'arc électrique selon *M.P. Planche* [10].

Il est possible de distinguer 5 zones:

- **La zone (1):** correspondant à l'injection des gaz plasmagènes. Leur type d'injection (axial, vortex ou radial) affecte l'écoulement plasma.

- **La zone (2):** correspond à la «tache cathodique», zone d'émission des électrons. Les électrons sont émis de cette zone de quelques mm² et la densité de courant émise par la tache peut être calculée par la formule (I.1) de Richardson-Dushmann **[11**, **12].**

$$j = A \cdot T^2 \cdot e^{e \cdot \Phi / K \cdot T} \quad \text{(I.1)}$$

Où:

j : est la densité de courant ($\mathrm{A.m^{-2}}$)

A: une constante dépendant du matériau ($\mathrm{A.m^{-2}.K^{-2}}$)

T: la température (K)

e : la charge d'un électron ($1{,}6.10^{-19}$ C)

Φ: le potentiel d'extraction du matériau (eV)

k: la constante de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}\,\mathrm{J.K^{-1}}$)

- **La zone(3):** correspond au développement de la colonne d'arc. Une partie du plasmagène est ionisée et subit un effet de pompage magnétohydrodynamique. C'est la naissance de l'écoulement plasma.
- **La zone(4):** correspond à la colonne d'arc proprement dite. Des perturbations prennent naissance en périphérie de la colonne d'arc facilitant le mélange entre les gaz froids et cette dernière.

- **La zone(5)**: correspond à la tache anodique où sont collectés les électrons L'accrochage de l'arc se produit quand la couche limite froide entourant la colonne d'arc est suffisamment chaude et conductrice pour que le champ électrique permette le claquage de l'arc électrique. L'écoulement de gaz plus froid en périphérie provoque une constriction de la colonne d'arc et la tache anodique, généralement de faibles

  dimensions est soumise à un fort flux thermique (jusqu'à $10^{11}\,\mathrm{W.m^{-2}}$) qui peut entraîner une fusion locale de la tuyère. Cependant, le pied d'arc soumis à différentes forces se déplace, ce qui aide à assurer l'intégrité de la tuyère au moins pendant un certain temps. Ces forces sont : les forces de trainées dues à l'écoulement et les forces électromagnétiques de Laplace dues à l'interaction entre le courant d'arc et le champ magnétique induit, elles se combinent à des effets thermiques à la paroi (figure I.13).

Enfin, en sortie de la tuyère s'écoule le jet de plasma en extinction qui se mélange avec le gaz ambiant.

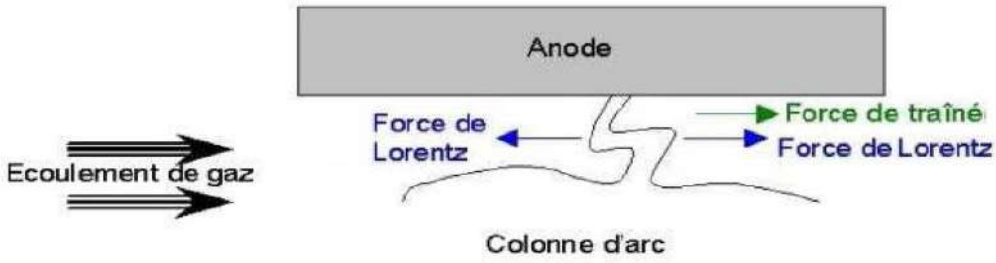


Figure I.13: Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc [9].

Le démarrage de la torche est assuré par une décharge radiofréquence (quelques MHz) haute tension (5-10 kV) entre la pointe de la cathode conique et l'anode cylindrique. L'arc électrique se développe et s'entretient ensuite sous une faible tension (<100 V) et un fort courant (de 300 à 900 A).

I.6.2 L'écoulement du jet de plasma

En sortie de tuyère, le jet de plasma possède une température à cœur élevée (de l'ordre de 5000 a 15000 K) [13, 14]. La vitesse de l'écoulement atteint une valeur comprise entre 600 et $2200\ m.s^{-1}$ selon la composition du plasma .Le jet plasma entre en contact avec le gaz environnant froid et statique. La différence des vitesses entre l'écoulement du jet plasma et les gaz environnants génère une couche de cisaillement entre les deux formants des anneaux de vortex autour du jet [15].

L'écoulement du jet passe d'un régime laminaire à un régime turbulent. La coalescence de ces anneaux en aval du jet, favorise la création de vortex plus grand dans lequel s'engouffrent et pénètrent les remous froids [16].

Ces vortex, donc les remous froids, sont entraînés par le jet, le mécanisme évoluant de façon continue (figure I.14) [17, 6]. Le taux de gaz engouffré dans le jet dépend de la vitesse et de la viscosité du jet plasma. Ces deux derniers sont fonction de nombreux paramètres : nature des gaz plasmagènes, température du jet… etc.

Il a aussi été montré [18, 6] que l'entraînement des gaz environnants est favorisé par les fluctuations du pied d'arc, elles-mêmes dépendant de la vitesse et de la viscosité du jet plasma.

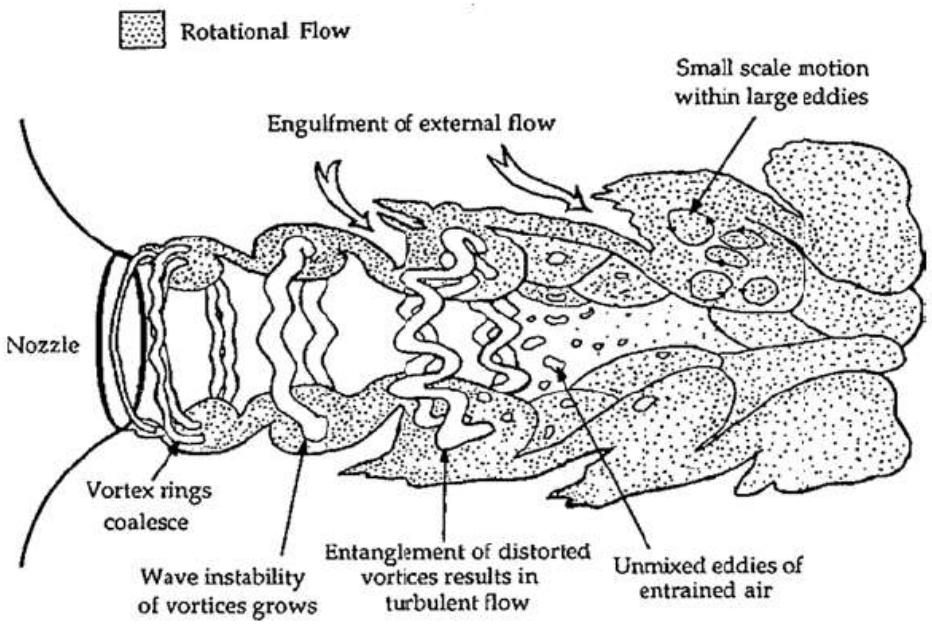


Figure I. 14: Description schématique du processus d'engouffrement [19].

La viscosité du jet plasma peut être décrite par la relation simplifiée suivante:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} = \frac{\sqrt{mKT}}{\sigma_0} \qquad \text{(I.2)}$$

Où:

σ_0**:** Section efficace (total scattering cross section) (m^2)

M: Masse molaire des gaz formant le plasma (kg)

T: Température des gaz plasmagènes (K)

K: Constante de Boltzmann (1,38.10-23 JK-1)

I.6.3 Les gaz plasmagènes

Les principaux paramètres accessibles à l'opérateur sont le choix du mélange de gaz plasmagènes, le courant d'arc et le diamètre de tuyère.

Les propriétés d'un mélange de gaz plasmagènes sont intrinsèquement liées à la composition de ce dernier. Les gaz fréquemment utilisés en projection plasma présentent, de façon individuelle et en fonction de leur température, de grandes variations de leurs propriétés (figure I.15). Ces variations sont liées à la dissociation des molécules de gaz et à l'ionisation des atomes. En jouant sur la proportion entre les gaz, il est possible d'agir sur les propriétés du mélange plasmagène.

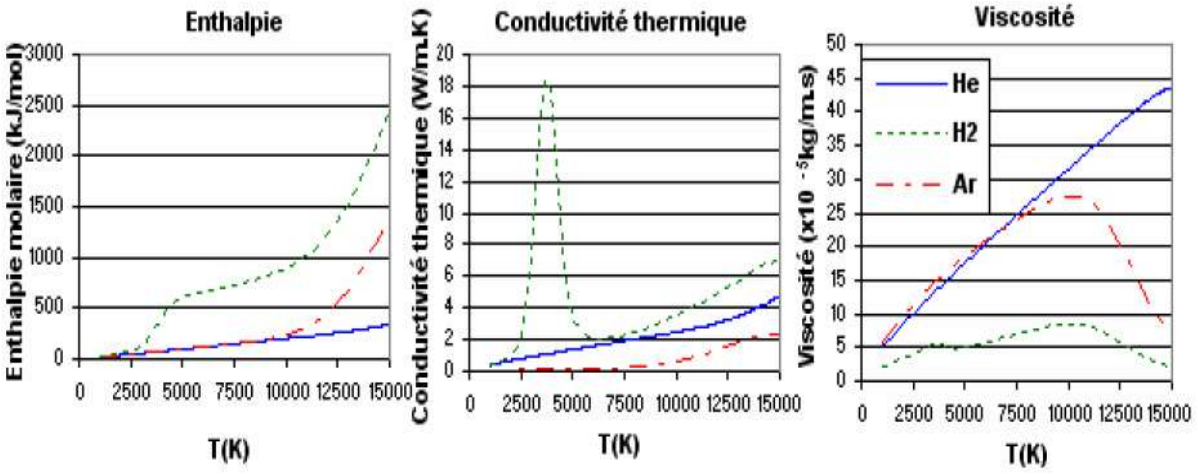


Figure I.15: Propriétés des principaux gaz plasmagènes utilisés en projection plasma [20].

Compte tenu de leurs propriétés thermodynamiques et de transports propres [21, 22, 23], chaque gaz plasmagène affecte le comportement de l'arc, celui de l'écoulement plasma, et le traitement du matériau injecté dans l'écoulement. L'influence des trois principaux gaz utilisés peut être présentée succinctement comme suit:

- L'argon permet d'augmenter la quantité de mouvement de l'écoulement du fait de sa masse molaire élevée.

- L'hydrogène permet d'augmenter l'enthalpie massique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique du plasma; il entraîne également une diminution de la viscosité. Cette diminution favorise l'engouffrement d'air dans l'écoulement.
  D'autre part, du fait de sa forte conductivité thermique et de sa faible masse volumique, l'hydrogène déstabilise l'arc électrique par une diminution de l'épaisseur de la couche limite froide qui entoure la colonne d'arc. L'arc opère alors en mode «restrike».
- L'hélium permet principalement d'augmenter la viscosité du jet et ainsi de retarder l'engouffrement d'air [24]. Il favorise un mode d'opération de l'arc de type «take-over».

L'augmentation de l'intensité du courant d'arc entraine une augmentation de la vitesse de l'écoulement, suivant la racine carrée de l'intensité [25], mais ne modifie pas de façon significative sa température. Dans cette gamme de température, l'enthalpie fournie au gaz est, en effet, essentiellement convertie en énergie d'ionisation et peu en chaleur sensible. Une augmentation du diamètre de la tuyère entraine une diminution de la vitesse du jet. Le rapport des vitesses entre deux tuyères de diamètres différents est inversement proportionnel au carré du rapport des diamètres de tuyère [25]. Ces variations sont présentées dans la (figure I.16).

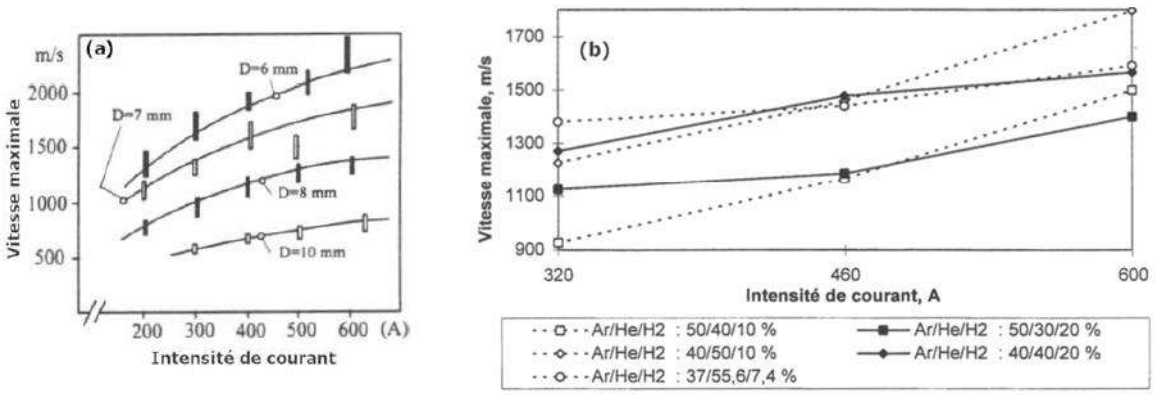


Figure I.16: Influence de l'intensité sur la vitesse maximale du gaz à 4 mm en sortie de tuyère.
(a) Mélange binaire Ar/H2 (45/15 **Nl/min**) D=Diamètre de tuyère
(b) Mélange ternaire Ar/He/H2 (débit total = 27 **Nl/min**), D= 6 mm.

I.6.4 Distance de tir

En projection à l'arc électrique, à la différence des procédés de projection à la torche, à l'arc plasma ou à la flamme, les particules subissent un refroidissement tout au long de leur trajectoire depuis les électrodes jusqu'au substrat. La distance de projection est donc un paramètre prépondérant pour s'assurer que les particules présentent encore un état de fusion satisfaisant au moment de l'impact. Une distance de projection trop courte peut entrainer un échauffement excessif du substrat. Par contre lorsque la distance est trop grande, les particules peuvent être trop froides voire partiellement resolidifiées lorsqu'elles impactent sur le substrat.

La caractérisation de dépôts (Tableau I-1) de NiCrAlY réalisés à 100 mm et 150mm de la sortie de buse montre une diminution du rendement de projection (de 58 a 55%), et de l'épaisseur déposée par passe lorsque la distance de tir est de 150 mm. Ceci peut s'expliquer par un refroidissement plus important des particules les plus fines qui ne participent plus, alors, à la formation du dépôt.

Les micrographies des coupes de dépôt montrent que les lamelles sont plus épaisses pour une distance de tir de 150 mm, ce qui peut indiquer qu'à cette distance, les particules ont une température plus faible, et donc une viscosité plus élevée a l'impact. Cependant, aucune variation significative de rugosité du dépôt n'est observée [26].

Tableau I-1: Propriétés de dépôts de NiCrAlY réalisés sous air à des distances de tir de 100mm et 150mm (250A, 38V) [26]

Distance de tir (mm)	Epaisseur du dépôt (mm)	Epaisseur par passe (µm)	Poids dépose (g)	Rendement de projection (%)	Rugosité Ra (µm)
100	160	40	4,8	58	12
150	140	35	4,3	55	11

La teneur en oxyde des dépôts réalisés à une distance de 150 mm diminue de 45% lorsque le gaz d'atomisation est de l'argon, tandis que pour des dépôts réalisés à 100 mm, la diminution de la teneur en oxyde est de 63%. Ceci peut s'expliquer par le fait que la quantité d'air mélange au gaz d'atomisation augmente avec la distance de tir [27].

I.6.5 Vitesse de l'écoulement

Dans la plupart des cas réels, la vitesse de projection de la goutte sur la surface (liquide ou solide) est très élevée. C'est le cas par exemple de la pulvérisation par spray, ou même de l'écrasement des gouttes d'eau sur les ailes d'un avion avec une vitesse d'impact de l'ordre de 300m/s. l'intervalle de temps entre l'impact et la fin de l'étalement est donc très court. L'écoulement est lié à un champ de vitesse qui évolue de façon importante au cours du temps. Avant l'impact, on se place dans le cas où la vitesse d'impact est normale au substrat et répartie de manière homogène dans la goutte. Lors de l'impact, cette vitesse change subitement de direction. Son intensité agit donc directement sur la nature de l'écoulement de la goutte. Cela se traduit initialement en termes d'énergie cinétique d'impact:

$$E_{ci} = \frac{1}{2} m_g V_i^2 \qquad (I.3)$$

Tout au long de l'écoulement, jusqu'à stabilisation du système, cette énergie évolue par conversion en d'autres types d'énergies jusqu'à dissipation totale de l'énergie cinétique afin d'atteindre l'état stable [28].

I.6.6 Transfert de chaleur plasma-particules

La densité de flux de chaleur $q\ (W/m^2)$, absorbée par un corps solide immergé dans un milieu plasma obéit à la loi de Newton:

$$q = h_\infty (T_\infty - T_s) \qquad (I.4)$$

Où:

h_∞ $(W/m^2 \cdot K)$ est le coefficient de transfert plasma-particules.

T_∞ (K) la température du gaz plasmagène.

Ts (K) la température de surface de la particule.

Ainsi lorsqu'une particule est plongée dans un bain plasma, elle est progressivement chauffée à travers une couche limite (figure I.17) par un flux de chaleur provenant de la conduction thermique (recombinaison ion électron et atome, bombardement électronique, absorption de rayonnement UV, activité catalytique vis-à-vis des espèces chargées et d'éventuelles réactions chimiques de type oxydation), et des courants convectifs lorsqu'elle se déplace. Cependant de ce flux de chaleur, il faut aussi soustraire les pertes radiatives (émission propre de la particule) [29].

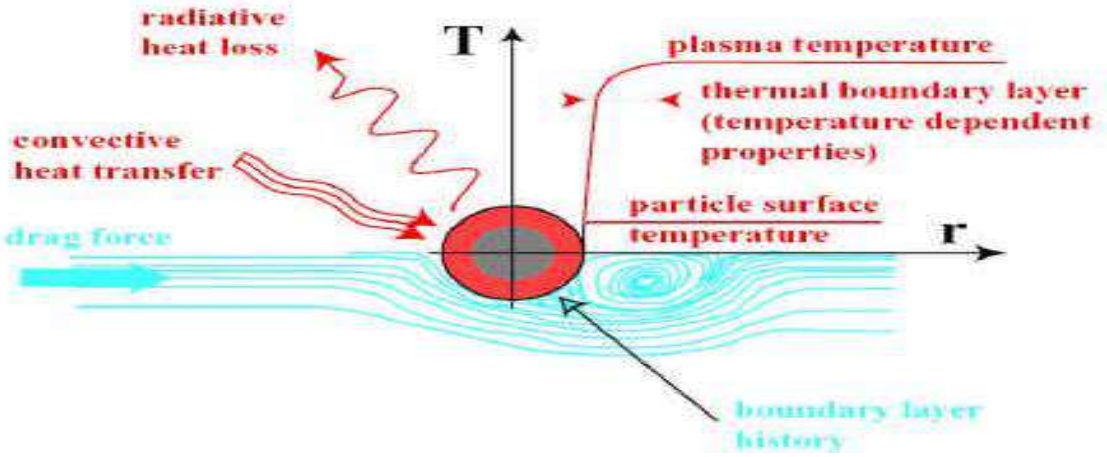


Figure I.17: Schématisation du transfert de chaleur plasma- partic [30].

I.6.7 Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat

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

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

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

La lamelle est la brique élémentaire constituant la couche. Sa morphologie et ses propriétés conditionnent la microstructure du dépôt et ses propriétés. L'analyse des

phénomènes à l'impact permet de corréler les paramètres de projection à la microstructure du revêtement [31].

I.6.8 Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat

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

L'augmentation de pression à l'interface entraîne la propagation d'une onde de pression à l'intérieur du matériau liquide qui peut provoquer son éjection partielle. *Mundo et al.* [32] ont déterminé un critère K, dit critère de Sommerfeld, reliant le comportement de la particule à l'impact aux nombres de Reynolds et de Weber. Ce critère est défini par l'équation (I.5):

$$K = We^{0,5} \cdot Re^{0,5} \qquad \text{(I.5)}$$

Où:

We est le nombre de Weber (équation I.6)
Re est le nombre de Reynolds (équation I.7).

$$We = \frac{\rho \cdot d \cdot V^2}{\sigma} \qquad \text{(I.6)}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot V}{\mu} \qquad \text{(I.7)}$$

Où:

ρ **:** est la masse volumique de la particule ($\mathrm{kg.m^{-3}}$).
V : sa vitesse ($m.s^{-1}$).
D : son diamètre (m).
σ *:* la tension de surface liquide -vapeur du matériau ($\mathrm{J.m^{-3}}$).
M : sa viscosité ($\mathrm{kg.m^{-1}.s^{-1}}$).

Si K est inférieur à 3 il y a rebond de la particule, si K est compris entre 3 et 57,7 il y a étalement sans éjection de matière et pour K supérieur à 57,7 il y a «splashing». (Figure I.18).

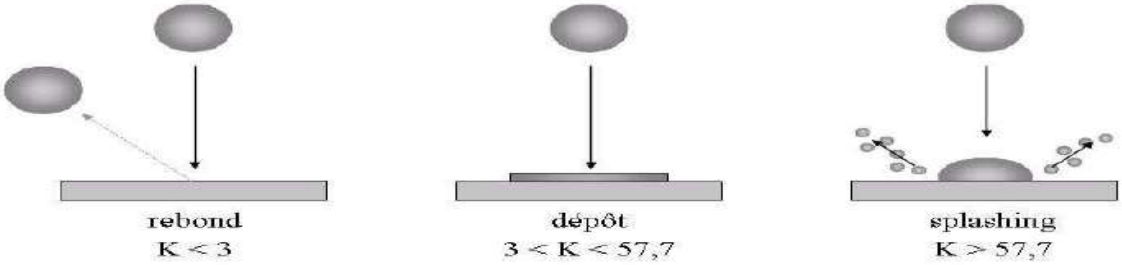


Figure I.18: Modes d'impact.

Les éclaboussures présentes dans le troisième mode apparaissent quelques dizaines de nanosecondes après l'impact et sont dues à la propagation de l'onde de pression [34].

I.6.9 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.19). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement [35, 36].

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 [37]. 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.

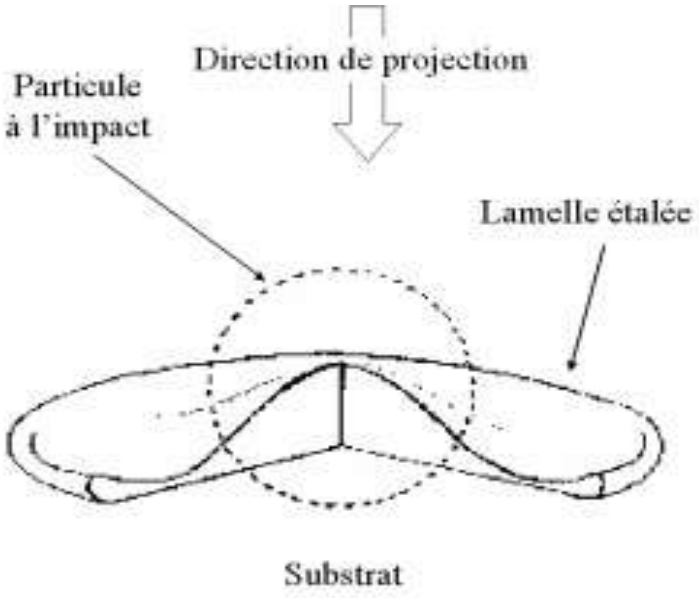


Figure I.19: Schéma d'écrasement de la particule [6].

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…) [6].

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 splats [38]. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température [39], de la rugosité [40] et des propriétés thermiques du substrat [41] sur l'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué [42]. 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) [43] 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.8):

$$\xi = {}^{D}/_{d} \tag{I.8}$$

A partir de l'équation (I.8) 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.9):

$$\boldsymbol{\xi = 1{,}29 \cdot Re^{0{,}2}} \tag{I.9}$$

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.10) [44].

$$\boldsymbol{\xi = A \cdot Re^{b}} \tag{I.10}$$

Où:

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

I.6.10 Solidification des lamelles

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

Ainsi, l'interface est caractérisée par un coefficient global d'échange thermique ***h*** quantifiant les échanges thermiques avec la lamelle et influant directement sur la vitesse du refroidissement (comprise entre 10^8à 10^9 $K.s^{-1}$ pour de la ZIRCONE yttriée sur substrat poli (BIANCHI et AL, 1997)).

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

$$\mathbf{Bi} = \frac{h \cdot e_p}{K_s} \qquad \text{(I.11)}$$

Où:

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

e_p **:** l'épaisseur de la lamelle.

K_s**:** la conductivité thermique du substrat ou de la couche déjà formée.

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

- Bi >30, le contact thermique est considéré parfait, la résistance thermique de contact est très faible (inférieure à 10^{-8}m².$K.W^{-1}$) le refroidissement est qualifié d'idéal.
- Bi <0,1, le transfert thermique à l'interface est limitant, la résistance thermique de contact est élevée (en général supérieure à 10^{-6}m².$K.W^{-1}$) et le refroidissement de la lamelle est isotherme.
- 0,01< Bi <30, le refroidissement est qualifié d'intermédiaire.

La vitesse de refroidissement est comprise entre 4.10^8et 5.10^9. [45].

I.6.11 Caractéristiques microstructurales des revêtements

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

Ce mouvement inclut généralement un décalage de la torche, entre chaque passage de la pièce devant la torche il définit le «pas de projection» qui conditionne le recouvrement des cordons. Il est nécessaire de contrôler ce recouvrement afin de contrôler le flux thermique apporté à la couche sous- jacente. *Bernard et al. (1990)* ont préconisé pour la projection de matériaux céramiques un taux de recouvrement de 50% et une épaisseur par passe maximale de 10 µm [46].

Le revêtement présente une structure lamellaire anisotrope et hétérogène résultant de la disparité de l'état thermocinétique des particules à l'impact, de leurs modes d'étalement et de solidification. Des contraintes au sein de la couche provoquent également l'apparition de fissures (figure I.20). Cette structure présente des pores qui jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques et thermiques de la couche. Ces pores peuvent être classifiés en trois catégories [47, 48, 49]:

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

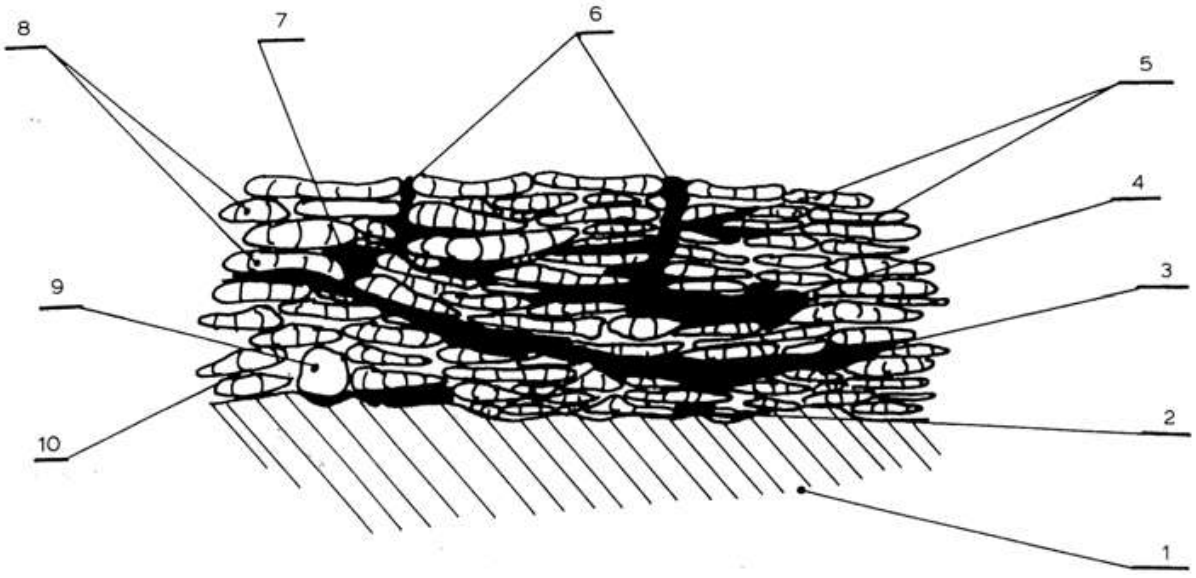


Figure I.20: Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma [30].

1: substrat;

2: défauts d'adhérence;

3: décohésion du dépôt due aux passes de la torche;

4: décohésion du dépôt due à la relaxation des contraintes résiduelles;

5: fissures au sein de lamelles;

6: fissures verticales résultant des contraintes résiduelles et porosité ouvert;

7: porosité fermée;

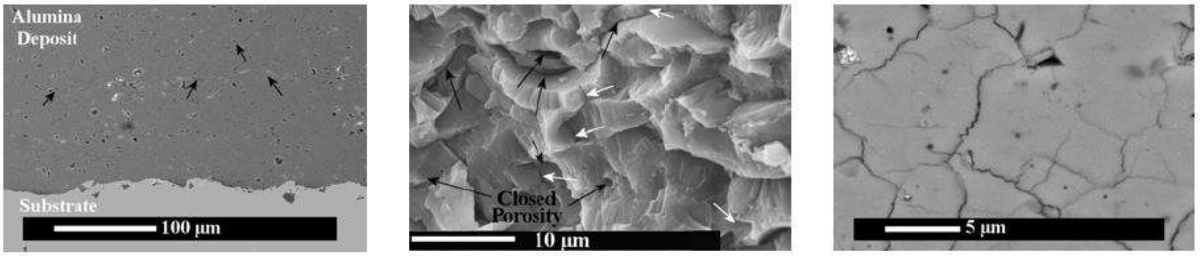
8: particules complètement fondues;

9: particules infondées;

10: mauvais contacts entre lamelles.

I.6.12 Dépôts d'alumine

Les figures I.21 a et b présentent, respectivement, les micrographies en coupe polie et après fracture des dépôts d'alumine élaborés à 573 K.



(a) (b) (c)

Figure I.21: Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) du dépôt d'alumine élaboré à 573 K. [6].

Les défauts inter-lamellaires (flèches noires sur la figure I.21.a) et de la porosité peuvent être observés sur ces images. La figure 1.21.b montre la structure lamellaire du dépôt d'alumine et la microstructure colonnaire des splats ainsi que les défauts intra-lamellaires (flèches blanches). Les micrographies de la surface polie du dépôt d'alumine (figure I.21.c) mettent en évidence la présence de porosité ainsi que des microfissures. Ces microfissures, liées aux contraintes de trempe, indiquent des contacts de bonne qualité entre les splats. Une structure similaire a été observée pour des dépôts d'alumine réalisés à 400 et 723K [6].

I.6.13 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 [50, 51].

I.6.13.1 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 [52, 53]:

- un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passavants et des graisses. C'est la première étape de préparation des pièces destinées à être revêtues. En effet, elle a pour conséquence la destruction et l'élimination de la plupart des impuretés (graisses, inclusions superficielles, etc.) généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements.

- un traitement mécanique appelé ≪sablage≫ qui permet la création d'un état de surface rugueux. Apres le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Outre la création d'une grande surface d'adhérence, la rugosité permet également de diminuer les contraintes résiduelles générées au sein du dépôt en empêchant leur addition par la séparation des grains écrasés, notamment pour les contraintes parallèles au substrat qui tendent à provoquer le décollement des dépôts.

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

I.6.13.2 Construction du dépôt

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire [54, 55] 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.22). 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.

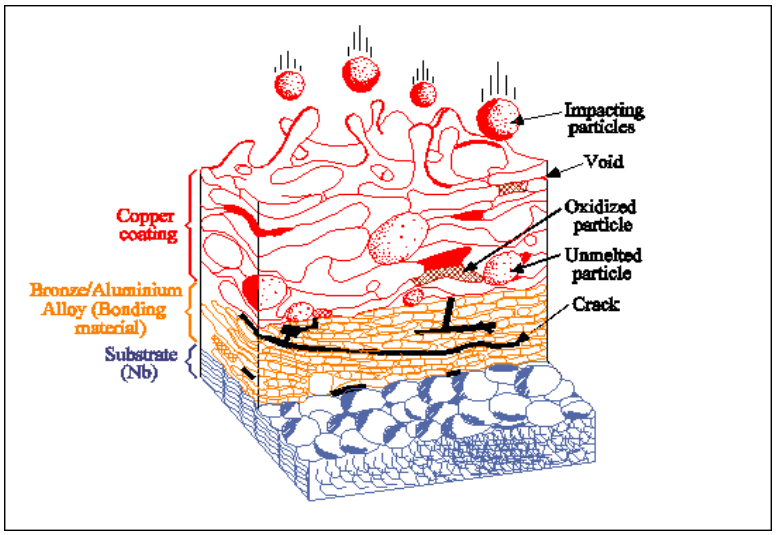


Figure I.22: Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique [85].

Outre la porosité, une caractéristique des dépôts arc-fil est leur forte teneur en oxyde comparée à celle des dépôts réalisés par d'autres techniques de projection thermique.

❖ Caractéristiques du dépôt

➢ 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.

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) [65,66].

I.7 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 mémoire 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.

CHAPITRE II :

MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction

La simulation numérique d'impact d'une goutte sur un substrat fait appel à des équations générales régissant l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible en régime laminaire. Nous ne considérons ici que les aspects relatifs aux caractéristiques dynamiques de l'écoulement laminaire avec transfert de chaleur.

II.2 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…).

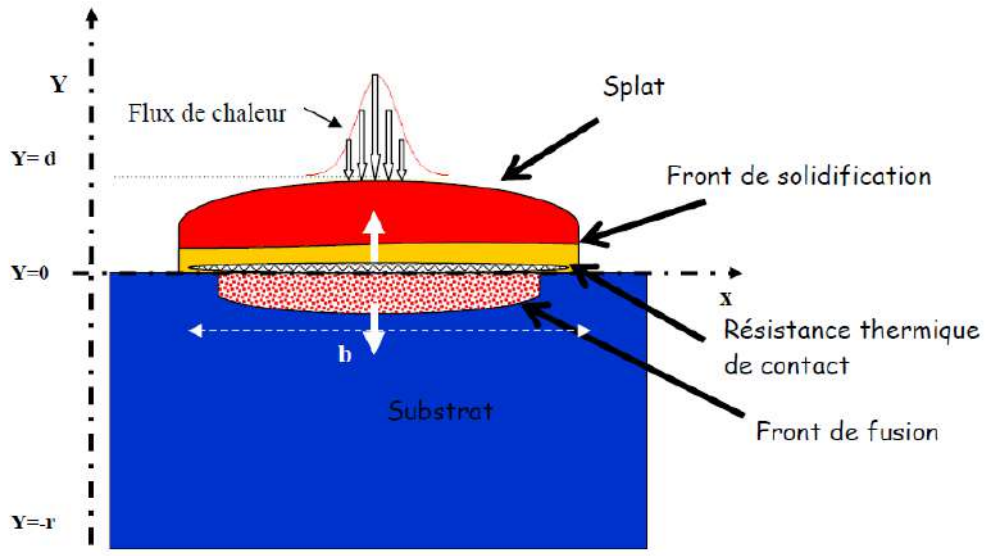


Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon [86]

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.2.1 Modélisation de l'écoulement des fluides

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

II.2.1.1 L'équation de la continuité

En mécanique des fluides, le principe de conservation de la masse peut être décrit par l'équation de continuité sous plusieurs formes différentes : locale conservative (dérivée en temps normale), locale non conservative (la dérivée en temps suit la particule dans son mouvement), ou intégrale. Suivant les problèmes posés, c'est l'une ou l'autre de ces équations qui pourra être retenue, toutes étant équivalentes.

On s'intéresse par l'équation de continuité global qui écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\vec{\nabla}\vec{V} = 0 \text{ Avec : } \left(\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V^p\nabla^p\right) \quad \text{(II.1)}$$

Dans un système de coordonnées cartésiennes, la vitesse $\vec{\mathbf{V}}$= (u, v, w) et $\boldsymbol{\rho}$ c'est la densité donc l'équation devient:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{(I.2)}$$

II.2.1.2 L'équation de quantité de mouvement

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

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

Où:

$\boldsymbol{\rho}$**:** La densité considérée variable avec le temps.

$\boldsymbol{\mu}$**:** La viscosité dynamique aussi variable.

P: La pression.

$\vec{\boldsymbol{g}}$ **:** La gravité.

II.2.1.3. Équation de l'énergie

$$\Gamma = \frac{k}{\rho c} \qquad \text{(II.4)}$$

T: température.

q: source volumique.

II.2.2 Modélisation bi phasique liquide/solide[84]

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

$\propto_i(X, t) = \begin{cases} 1 \; si \; X \in \Omega_i \\ 0 \; si \; X \in \Omega/\Omega_i \end{cases}$; $i \in \{l, s\}$

$\propto i = \propto$ et $\propto s = 1 - \propto$

Dans le cadre général d'un problème faisant intervenir deux phases, un liquide et un solide, notre objectif est de parvenir à un modèle unique capable de traiter les trois configurations types illustrées figure II 2.
La principale différence entre ces trois problèmes est la définition du paramètre $\propto$ qui peut être constant (modèle statique et homogène), fonction uniquement de l'espace (problème statique) ou fonction de l'espace et du temps (problème dynamique).

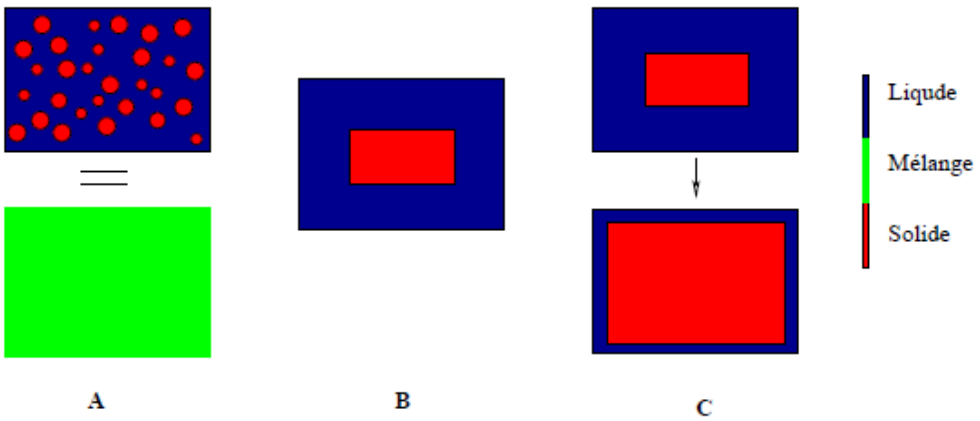


Figure II.2: Répartition des phases pour trois problèmes biphasiques types: A Mélange homogène; B Répartition statique des phases; C Problème dynamique de type changement de phase[84].

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 [106 et Al qui traite la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leur morphologie, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière .

II.3.1 Transfert de chaleur avec changement de phase

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

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

II.3.1.1 Méthode à grille mobile

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

Dans le domaine occupé par la phase liquide l:

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

Dans le domaine occupé par la phase solide s:

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

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

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

Dans les équations ci- dessus,
n représente la normale à l'interface $\Gamma(x,t) = 0$

ϑ_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 ligne (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier[87].

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

II.3.1.2 Méthode à grille fixe

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

- **La méthode d'enthalpie**

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

L'équation d'énergie est écrite à la fois dans la phase liquide et la phase solide, et pour déterminer la progression de l'interface Γ, le modèle de conduction prend en compte la chaleur latente. Cette formulation requiert un algorithme de suivi du front particulièrement

fin. La fonction d'enthalpie massique H(T) est introduite (figure II.3) elle inclut la chaleur latente par unité de masse L_f et est définie comme suit:

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

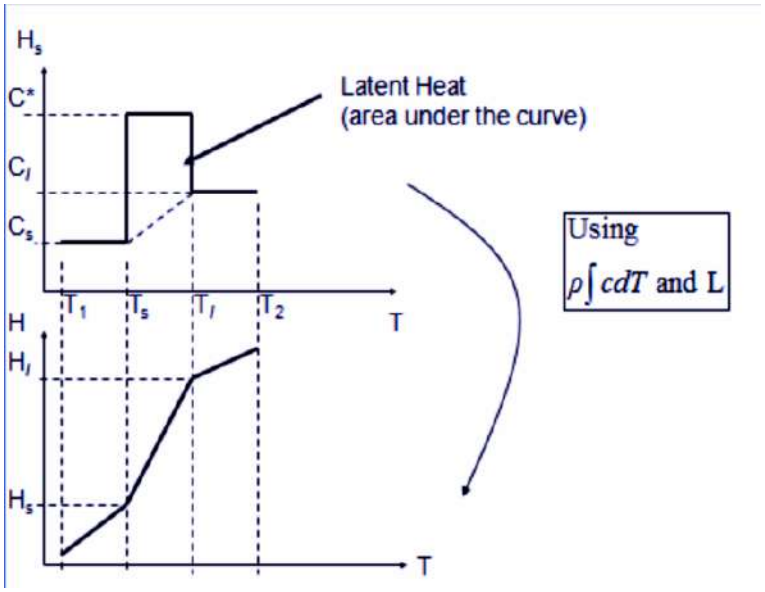


Figure II.3: Évolution de l'enthalpie en fonction de la température [92].

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

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

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

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

Et en fonction de la température:

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

➢ La méthode de la chaleur spécifique équivalente

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

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

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

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

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

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

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

II.3.2 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.

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

II.4 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.4) en fonction de maillage que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).

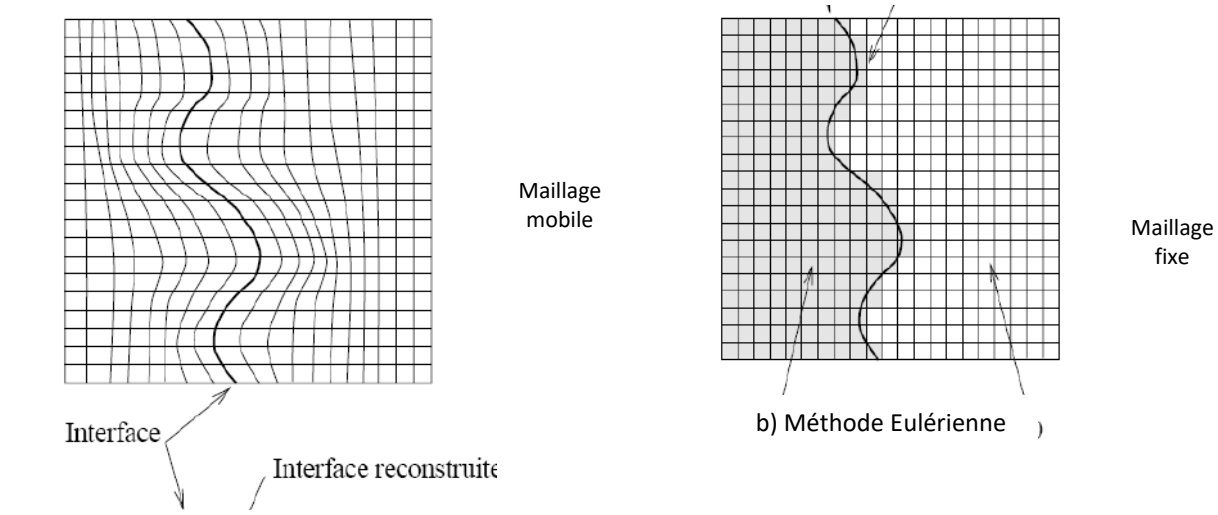


Figure II.4 : Présentation des méthodes de calcul d'interface
a) méthode Lagrangienne, b) méthode Eulérienne [93].

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

- La méthode eulérienne : elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides .l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que

la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première [94] ; cependant de part sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation couleur.

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

- Les méthodes de suivi de front
- Les méthodes de suivi de volume

II.4.1 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)

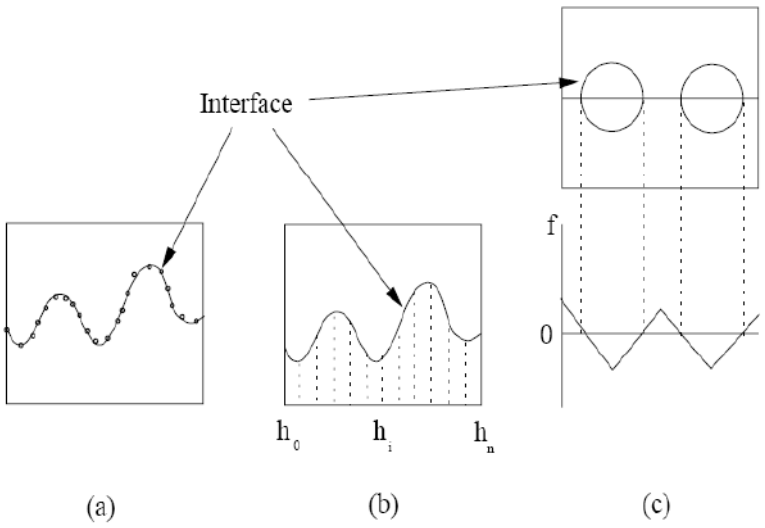


Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de front
a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau [95]

II.4.2 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.

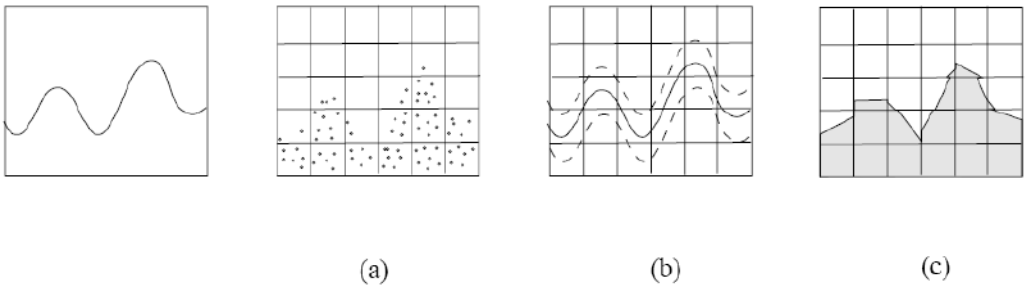


Figure II.6 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque[97].

a) Méthode de marqueur de volume
b) Schémas TVD
c) Méthode de volume de fluide (VOF)

On utilise pour la méthode VOF (volume of fluide) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur 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.7).

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
0.00	0.42	0.01	0.45	0.82	0.01
0.48	1.00	0.46	0.00	1.00	0.88
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Figure II.7 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [98]

II.4.3 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.8). 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.

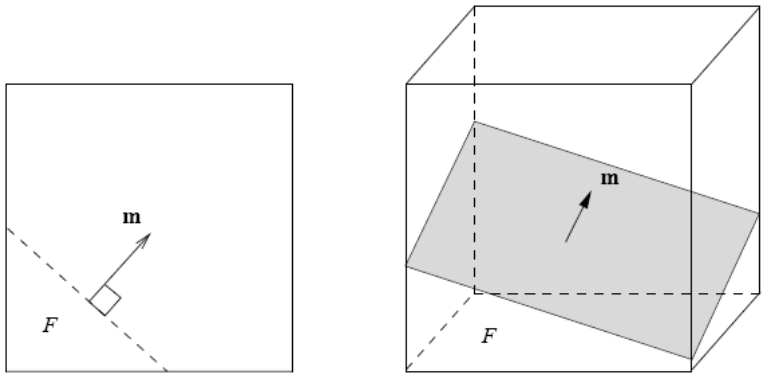


Figure II.8 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique [99].

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

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

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 :

$$Var_{i} = C.Var_{goutte} + (1 - C).Var_{air} \qquad (II.17)$$

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc.

II.5 Conclusion

A la fin de ce chapitre nous avons fait un aperçu sur les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes thermiques et dynamique. Ainsi que une présentation de la méthode de volume de fluide (VOFCIAM) que nous utilisons pour simuler le problème diphasique, et la méthode de chaleur spécifique équivalente pour le contrôle de la solidification.

CHAPITRE III:
MODELISATION NUMERIQUE

III.1 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.2 Discrétisation des équations

Pour passer d'un problème exact continu régit par EDP au problème approché discret, il existe trois grande famille de méthodes : [4]

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

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 [11].

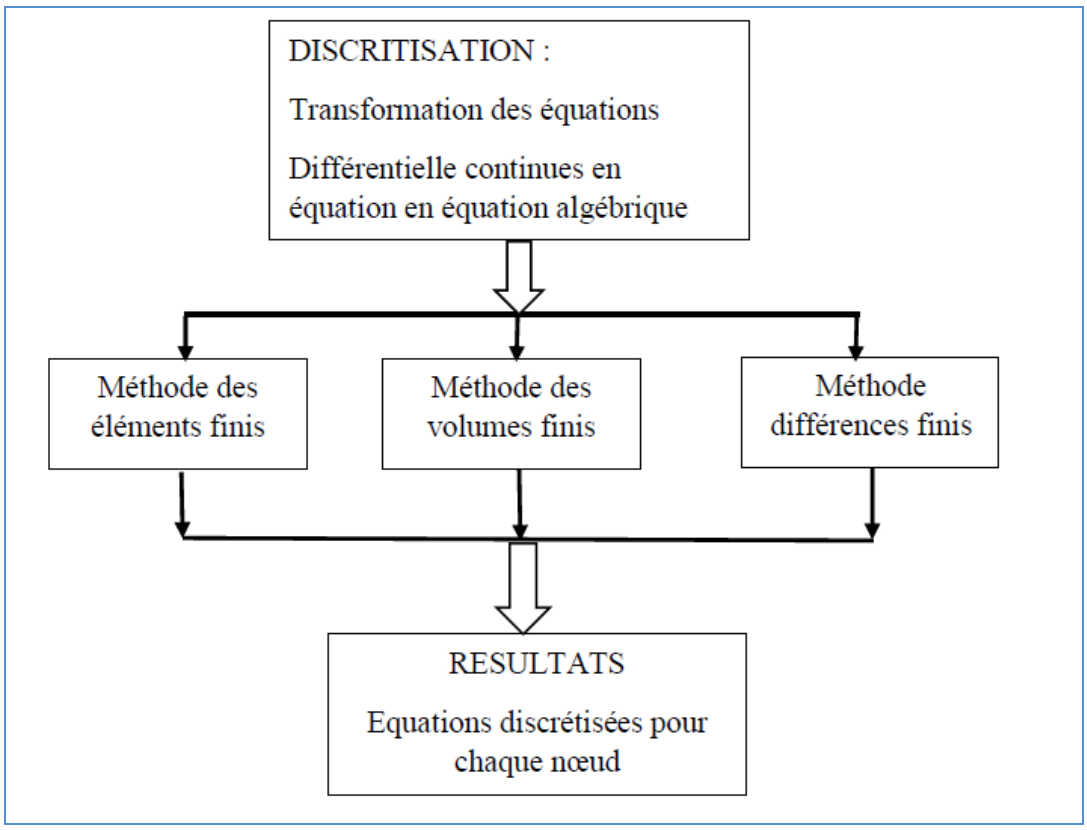


Figure III.1: Méthode de discrétisations [11].

- La méthode des différences finies consiste en une discrétisation des opérateurs différentiels sur une grille de pas d'espace fixe à l'aide de développements de Taylor tronqués. Soit par exemple l'équation aux dérivées partielles

$$\partial_t u + \alpha \partial_x u = 0, \quad \alpha > 0 \qquad \text{(III.1)}$$

Un schéma aux différences finies possibles est :

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} + \alpha \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{\Delta x} = 0 \qquad \text{(III.2)}$$

- La méthode des volumes finis est la méthode de choix pour les équations de conservation non linéaires. Voilà quelques propriétés. Soit par exemple le système de lois de conservation en dimension deux d'espace

$$\partial_t U + \partial_x f(U) + \partial_y g(u) = 0 \qquad \text{(III.3)}$$

- La méthode des Éléments finis s'appuie sur une formulation variationnelle de l'équation aux dérivées partielles. Il n'existe pas de formulation variationnelle pour toute équation aux dérivées partielles. Les méthodes d'Eléments finis ne sont pas bien adaptées à la résolution numérique d'équations non linéaires

III.3 Résolution des équations par éléments finis

- **Définition de la méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis (MÉF) [1] est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à recherche rune formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ;
la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème [11].

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode d'interpolation et une méthode vibrationnelle. Etant donné un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0.

a) la méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite à partir d'un nombre fini de réels
b) la méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations.

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

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_h^k$, est de la forme [101]:

$$\emptyset_h^k(x,y) = \sum_{i=1}^{Nk} \emptyset_i N_i(x,y) \qquad \text{(III.4)}$$

Où :
$\emptyset_i$ Désigne la valeur de la fonction approchée $\emptyset_h$ au point x_i de coordonnées (x_i, y_i),
N_i la fonction d'interpolation associée à x_i,

$\mathbf{N_k}$ le nombre de fonctions utilisées pour l'élément K.

Les coefficients $\emptyset_i$de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret. Les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie N_h dans lequel on cherche à priori la solution discrète $\emptyset_h$.

Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est utilisée : l'erreur commise est minimisée en remplaçant dans les équations aux dérivées partielles la fonction exacte par la fonction approchée. Pour cela, on projette l'erreur sur un espace de fonction $\emptyset_h$à préciser.

La méthode de Galerkin est un cas particulier de la méthode des résidus pondérés, l'espace de projection est le même que l'espace d'approximation de la solution du problème, autrement dit $\emptyset_h$ =N_h.

- **Domaines d'application de la MEF**

  - Analyse linéaire (statique et dynamique)
  - analyse non linéaire (grands déplacements, grandes déformations, contact et frottement, flambage, ...)
  - Mise en forme des matériaux
  - Thermique (en régime permanent et transitoire, ...)
  - Mécanique des fluides
  - Électromagnétisme
  - Dynamique rapide (choc, impact, crash)
  - optimisation des structures [104]

- **Principes de la MEF**

  - La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des point s'appelés nœuds.

  - Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.

  - La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques [104].

- Les nœuds et les éléments n'ont pas forcement de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.

- **Étapes logiques du calcul par éléments finis**

  - Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage)
  - Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire [ke] reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux {ue} et les forces {fe} appliquées aux nœuds : [ke] {ue} = {fe}
  - Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global [K] {U} = {F} de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds
  - Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
  - Résoudre le système [K] {U} = {F} et obtenir les déplacements {U} aux nœuds
  - Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées [104].

- **Etapes pratiques du calcul par MEF**

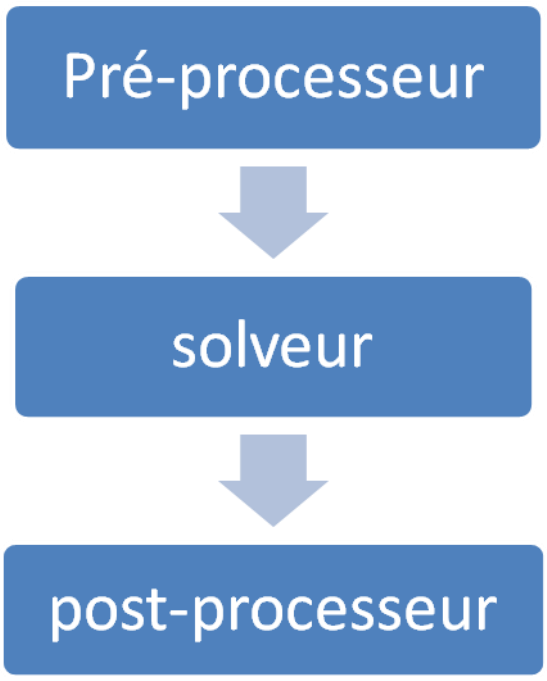


Figure III.2 : Organisation générale d'un code de calcul [104]

III.3.1 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.3.1.1 Formulation variationnelle forte

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

Trouver u(x) *u(x)* espace des solutions $U_S$telles que [102,103] :

$$\mathcal{L}(\mathbf{u}) - \mathcal{F} = 0 \ \forall \mathbf{x} \in \Omega \ \mathbf{B}(\mathbf{u}) = \mathbf{u_0} \ \forall \mathbf{x} \in \Gamma_{\mathbf{u0}} \qquad \text{(III.5)}$$

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

III.3.1.2 Formulation variationelle faible

La formulation variationnelle faible peut être obtenue par les étapes suivantes :

1. approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par $\tilde{u}$tel que [101,104] :

$$\tilde{\mathbf{u}} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i} \tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i} \qquad \text{(III.6)}$$

Où : $\mathbf{N_i}$ =$\mathbf{N_i}$ (x, y) désignent les fonctions de forme et$\tilde{u}_i$des valeurs nodales indéterminées.

2. introduire (III.6) dans (III.5) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathcal{L}(\tilde{\mathbf{u}}) - \mathcal{F} \neq 0 \qquad \text{(III.7)}$$

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

$$\int_\Omega \mathbf{W_k}(\mathcal{L}(\tilde{\mathbf{u}}) - \mathcal{F}) \mathbf{d\Omega} = 0, \mathbf{k} = 1, 2, .. \mathbf{N} \qquad \text{(III.8)}$$

Où N Nombre d'inconnues indépendants du système (III.5).

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

On pose

$$\mathbf{W_k} = \mathbf{N_k} \Longrightarrow \int_\Omega \mathbf{N_k}.\mathcal{L}(\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i} \tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i}) \mathbf{d\Omega} = 0 \qquad \text{(III.9)}$$

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

$$\forall \mathbf{v} \in \mathbf{H_0^1(\Omega)} : \mathbf{a}(\tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{v}) = \int_\Omega \mathbf{f} \ \mathbf{v} \ \mathbf{d\Omega} \qquad \text{(III.10)}$$

a($\tilde{u}, v$) est la forme bilinéaire associée à $\mathcal{L}$Soit Ω un ouvert borné de R^d et $\partial\Omega$ est régulier. On considère alors le problème :

$$\mathbf{Lu = 0\ sur\Omega\ et\ u = 0\ sur\ \partial\Omega} \qquad \text{(III.11)}$$

III.3.2 Forme généralisée des équations du système et discrétisation

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_{\emptyset}\emptyset) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) + S_{\emptyset} \quad \text{(III.12)}$$

Où :

$\emptyset$: Variable généralisée.

$C_{\emptyset}$: Coefficient d'advection transitoire.

$\Gamma_{\emptyset}$: Coefficient de diffusion.

$S_{\emptyset}$: Terme source.

Le tableau (III.1) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système.

Tableau III.1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables [105]

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

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

Le procédé de discrétisation par EF consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire [102].

$$\left([\mathbf{A}_e^{\mathbf{transient}}] + [\mathbf{A}_e^{\mathbf{advection}}] + [\mathbf{A}_e^{\mathbf{diffusion}}]\right)\{\emptyset_e\} = \{\mathbf{S}_e^{\emptyset}\} \qquad \textbf{(III.13)}$$

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

III.3.3 Terme temporel

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement [102] :

$$[\mathbf{A}_e^{\mathbf{transient}}] = \int \mathbf{W}^e \frac{(\partial \rho c_\emptyset \emptyset)^e}{\partial t} \mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.14)}$$

Avec :

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

Pour le nœud i:

$$\int \mathbf{W}_i^e \frac{(\partial \rho c_\emptyset \emptyset)^e}{\partial t} \mathbf{d(vol)} = \int \mathbf{W}_i^e \rho c_\emptyset \mathbf{W}_j^e \mathbf{d(vol)} \frac{\partial \emptyset_j^e}{\partial t} + \int \mathbf{W}_i^e \frac{\partial \rho c_\emptyset \emptyset_j^e}{\partial t} \mathbf{W}_j^e \mathbf{d(vol)} \emptyset_j^e \text{ (III.15)}$$

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

$$\mathbf{M_{ij}} = \int \mathbf{W}_i^e \rho c_\emptyset \mathbf{W}_j^e \mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.16)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée :

$$\mathbf{M_{ij}} = \delta_{ij} \int \mathbf{W}_i^e \rho c_\emptyset \mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.17)}$$

Où :

δ_{ij} =delta de Kronecker (0 si i ≠ j, 1 si i = j)

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.

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

Où :

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

L'équation (III.16) est écrite comme suite:

$$\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_n = \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\emptyset)_{n-1} + \left(1-\frac{1}{\delta}\right)\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\right)_{n-1} \quad \text{(III.19)}$$

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.

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\emptyset)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\emptyset)_n}{2\Delta t} \quad \text{(III.20)}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} = \frac{(\rho\emptyset)_n}{\Delta t} - \frac{(\rho\emptyset)_{n-1}}{\Delta t} \quad \text{(III.21)}$$

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.3.4 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).63

III.3.4.1 Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des 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.3: " l'Approche des ligne de courant D'Upwind ".

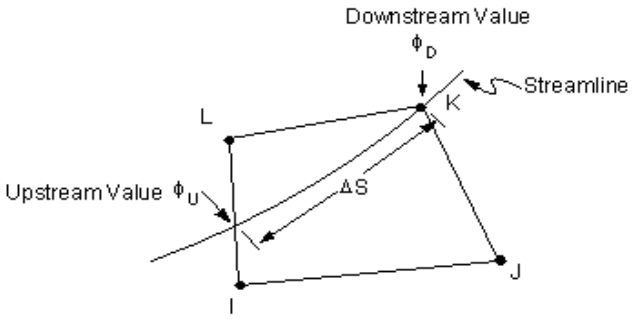


Figure III .3 : Approche de ligne de courant d'Upwind [105]

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

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

$$\frac{\partial(\rho C_\emptyset V_x \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_\emptyset V_y \emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho C_\emptyset V_s \emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III.22)}$$

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_\emptyset V_s \emptyset)}{ds} \int W^e d(vol) \qquad \text{(III.23)}$$

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:

$$\frac{d(\rho C_\emptyset V_s)}{ds} = \frac{(\rho C_\emptyset V_s \emptyset)_U - (\rho C_\emptyset V_s \emptyset)_D}{\Delta s} \qquad \text{(III.24)}$$

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. Voir le schéma (III.1).

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.3.4.2 Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left\{\frac{\partial(\rho V_x C_{\emptyset\emptyset})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_{\emptyset\emptyset})}{\partial y}\right\} d(vol) + C_{2\tau} \int \frac{Zh}{2U_{max}^e} \left\{V_x^e \frac{\partial W^e}{\partial x} + V_y^e \frac{\partial W^e}{\partial y}\right\} \left\{V_x^e \frac{\partial(\rho c_{\emptyset\emptyset})}{\partial x} + V_y^e \frac{\partial(\rho c_{\emptyset\emptyset})}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III.25)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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.3.4.3 Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left\{\frac{\partial(\rho V_x C_{\emptyset}\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_{\emptyset}\emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) + C_{2\tau} \int \frac{Zh}{2U_{max}^e} \left\{\frac{V_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial W^e}{\partial y}\right\} \left\{\frac{V_x^e \partial(\rho c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho c_{\emptyset}\emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III.26)}$$

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

III.3.5 Terme de Diffusion

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

$$Diffusion\ contribution = \int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) d(vol) + \int W^e \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) d(vol) \quad \text{(III.27)}$$

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 [105] :

$$\int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) d(vol) = \int \frac{\partial W^e}{\partial x} \Gamma_{\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial x} d(vol) \quad \text{(III.28)}$$

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

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = \mathbf{W_x^e}\emptyset \qquad \text{(III.29)}$$

$$\mathbf{W_x^e} = \frac{\partial \mathbf{W^e}}{\partial x} \qquad \text{(III.30)}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[\mathbf{A_e^{Diffusion}}\right] = \int (\mathbf{W_x^e \Gamma_\emptyset W_x^e} + \mathbf{W_x^e \Gamma_\emptyset W_x^e})\mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.31)}$$

III.3.6 Termes source

L'évaluation des termes de source se fait comme suite [105]:

$$S_\emptyset^e = \int W^e S_\emptyset d(\text{vol}) \qquad \text{(III.32)}$$

III.4 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.

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction

Arrivés à ce chapitre, nous allons traiter des résultats de la simulation numérique que nous avons effectuée via le progiciel « ANSYS V11 (MECHANICAL APDL)» dont le procédé de calcul se base sur la méthode des éléments finis, pendant laquelle nous avons analysé l'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier et que nous allons comparer avec les résultats de JAVAD MOSTAGHIMI [106], qui a effectué la même expérimentation au préalable puis nous allons effectuer une deuxième simulation dans laquelle on prendra deux gouttes d'aluminium mais qui auront deux conditions physiques différentes ; l'une sera en présence d'une particule d'air tandis que la deuxième ne le sera pas et servira de goutte de contrôle afin qu'on puisse étudier la morphologie de l'étalement des gouttelettes sur le substrat lors de leur impacte sur celui-ci.

Ainsi; nous serons en mesure de varier l'angle d'injection de plasma afin de voir l'effet qu'aura ce changement sur l'impact et l'étalement des gouttelettes sur le substrat.

La première partie du chapitre discutera du problème physique que nous avons à traiter et qui dans une deuxième partie sera modélisé au sein de notre simulateur.

Les résultats obtenus via **ANSYS11**, seront extrait afin d'être exploités de manière plus approfondie sur d'autres logiciels qui ne sont autres que **Origin.v8** et **Tecplot**, et ces deux logiciels seront utilisés respectivement; l'un pour tracer les graphiques qui exprimeront les gradients de température et de pression, et l'autre pour étudier la distribution de la température lors de l'impact de la gouttelette sur le substrat.

L'objectif d'étude de la projection plasma est la compréhension des phénomènes impliqués dans ce processus (phénomène d'étalement des particules, interaction particule-plasma, impact des particules sur le substrat…), et l'influence de l'impact oblique sur la formation de la lamelle.

IV.2 Description du progiciel « ANSYS 11 »

IV.2.1 Présentation du progiciel

ANSYS est un progiciel commercial destiné à la modélisation et à la simulation de problèmes physiques réels et dont la fiabilité a fait ses preuves dans le domaine industriel, toutes opérations confondues.

Basé sur un code de calcul MEF (méthode des éléments finis) et ayant divers microprogrammes intégrés destinés au dessin, au maillage, au calcul…etc. Ce qu'il lui permet de couvrir toutes les étapes d'une simulation numérique et de modéliser et d'étudier des problèmes physiques et multi-physiques complexes tels que des problèmes liés à la mécanique des fluides, à la structure, à l'électromagnétisme, la thermique…etc.

IV.2.2 Les avantage du progiciel ANSYS

- Une interface graphique utilisateur intuitive avec facilité d'utilisation.
- Compatibilité avec tous les outils CAO (conception assistée par ordinateur) 3D disponibles sur le marché.
- Outils de convergence et d'optimisation automatiques.
- Possibilité de diviser les problèmes physiques complexes en plusieurs étapes.
- Gain de temps et de matière, du fait que la simulation numérique ne demande pas à fabriquer des prototypes afin de les tester.

IV.2.3 Etapes nécessaires à la simulation d'un problème physique

- Définition du type de calcul (2D ou bien 3D)
- Choix du maillage
- Equation de résolution
- Les conditions aux limites initiales
- Choix du schéma de calcul et définition des paramètres numériques.

IV.2.4 Schéma de logiciel ANSYS

L'ANSYS utilise la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristique ou blocs fonctionnels décrits sur la figure IV.1

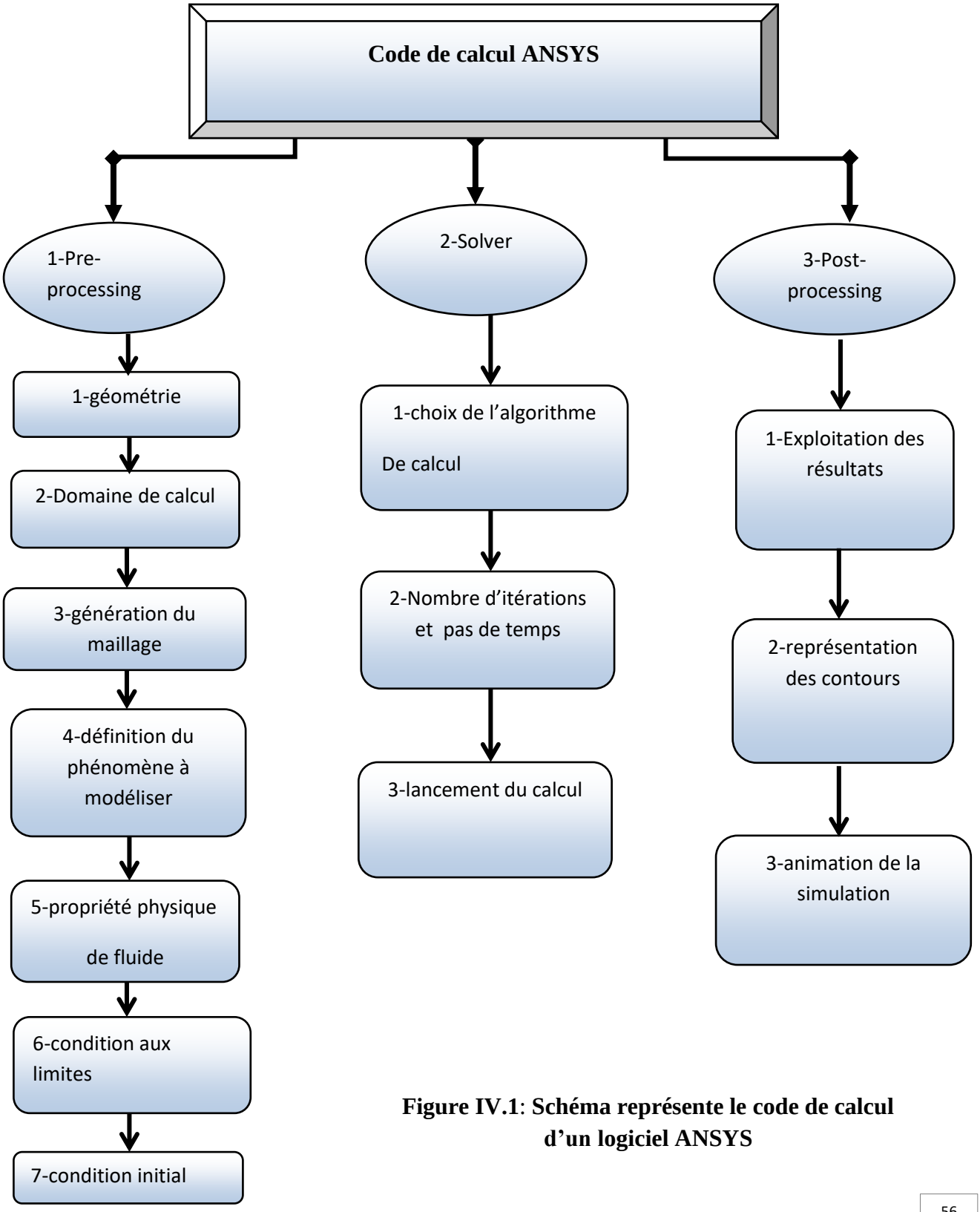


Figure IV.1: Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.3 Description du domaine d'application

Comme présenté dans l'introduction nous allons d'abord valider les résultats de la simulation d'impact de la goutte d'aluminium sur le substrat d'acier avec les mêmes conditions proposées par JAVAD MOSTAGHIMI[106], ensuite nous allons ajouter une deuxième particule d'aluminium dont les conditions physiques seront différentes de celles de la première goutte qui servira de goutte de contrôle du fait qu'elle est pénétrée par une particule d'air, puis dans la troisième partie; on essayera différents angles de jet de plasma tout en variant son gradient de vitesse selon les axes X et Y pour étudier l'influence de l'impact oblique sur la formation de la lamelle, et on répète les mêmes étapes pour tous les angles choisis.

IV.4 Les dimensions de la géométrie

Nous allons modéliser notre environnement sous forme d'un grand rectangle de largeur égale à 25mm et de longueur égale à 20mm et qui contient une particule d'aluminium de diamètre égal à 3,92mm. Le substrat est de forme rectangulaire située au dessous du premier rectangle et possède la même longueur que le premier rectangle mais sa largeur est de 3mm.

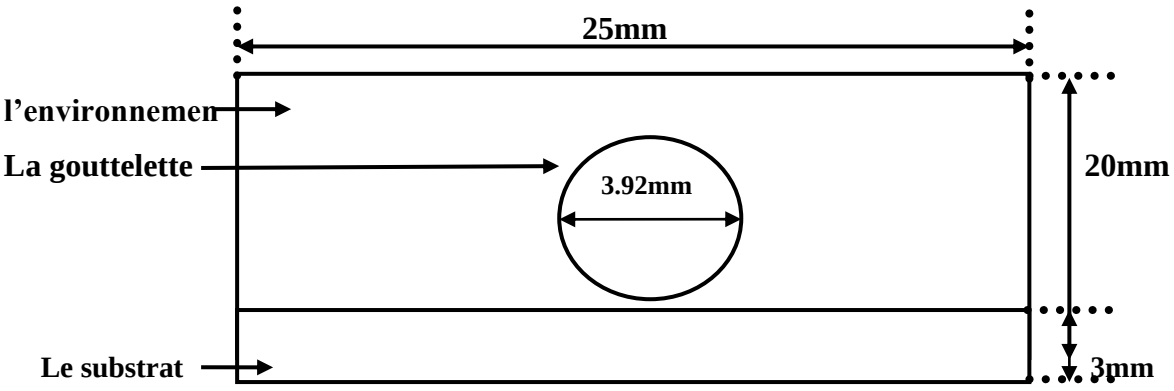


Figure IV.2: représentation des dimensions de la géométrie étudiée

IV.5 Matériaux utilisé

Au cours de notre étude, nous avons choisi de faire l'expérimentation avec des gouttelettes d'aluminium du fait que cette étude fut réalisée au préalable par MEBDOUA Yamine; MINXIA Xue; YOAV Heuchal; SANJEEV Chandra; et JAVAD MOSTAGHIMI [106] et qui avaient choisi le même matériau, ainsi les résultats obtenus pourront faire l'objet d'une comparaison fructueuse avec les résultats qu'ont obtenu nos prédécesseurs.

IV.5.1 Matériaux utilisé (particule d'impact)

Nous avons utilisé l'aluminium comme matériau, ce dernier est un élément chimique dont le symbole sur la table périodique des éléments chimiques est «Al» et le numéro atomique «13». L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre. L'importance de l'aluminium est cruciale du fait qu'il est employé dans différentes industries partout dans le monde notamment dans l'industrie aérospatiale, ce qui fait de lui un matériau de première nécessité.

IV.5.1.1 Propriétés de l'aluminium à l'état pur

- **Propriété physique**

Tableau IV.1: propriété physiques de l'aluminium [107]

Propriétés physique	
Température de fusion	600°C
Point d'ébullition	2060°C
Chaleur spécifique	à 20°C : 0,214 cal/g°C à 500°C : 0,266 cal/g°C
Conductibilité thermique	à 0°C : 0,50 cal/cm.s°C à 200°C : 0,52 cal/cm.s°C
Résistivité à l'état pur	2,63.10-8 Ω.m.
Masse molaire atomique	26,981 g/mol
Densité	2,698 kg/m^3
Conductibilité électrique	pour l'aluminium pur à 99,5 %
Allongement linéaire	20 à 100°C : 24. 10-6 /°C .

Tableau IV.2: propriété mécanique de l'aluminium [107]

❖ **Propriété mécanique**

Propriété mécanique	
résistance à la traction	70 à 100 N/mm².
limite élastique	30 à 40 N/mm²
allongement	15 à 25 %.
module d'élasticité	67500 N/mm²

❖ **Propriété chimique**

L'aluminium est un matériau très résistant à la corrosion[107].

IV.5.1.2 Avantages de l'aluminium

- Une bonne résistance aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de $1.09.10^6$j/kg[108]..
- Une bonne résistivité électrique >1012 Ohm.m [108].
- Une bonne résistance à l'usure[108].
- Une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance a l'oxydation[108].

IV.5.1.3 Domaines d'utilisation[107]

- **Les applications mécaniques:** l'aluminium est l'abrasif le plus répandu aussi Il est utilisé aussi pour le revêtement**[107]**.
- **Les applications réfractaires** l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion et les hautes températures**[107]**.
- **Les applications médicales :** le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie.
- **Les applications électriques et électroniques**: l'aluminium est utilisé dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation**[107]**.

IV.5.2 Le matériau revêtu (le substrat)

Le substrat revêtu est en acier, ce dernier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone .C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle «acier».

IV.5.2.1 Propriétés à l'état pur de l'acier

Tableau IV.3: propriété thermo-physique de l'acier [108]

Propriétés	
Module de YOUNG	200 GPa
Le coefficient de dilatation thermique	$11{,}7\times10^{-6}$ °C^{-1}
le coefficient de POISSON	0.27 ÷ 0.30
la conductivité thermique	11.2 ÷ 48.3 W/mK

IV.5.2.2 Domaines d'utilisations[108]

Dans le secteur automobile: l'acier représente de 55 à 70% du poids d'une voiture, Châssis et carrosserie, pièces de moteur, de direction, ligne d'échappement, carcasse de pneu.

Dans la communication: Les composants électroniques utilisés en informatique ou dans les télécommunications, ainsi que les éléments fonctionnels du tube des téléviseurs couleurs sont des pièces délicates, aux exigences particulières.

Dans la construction de ponts ou de bâtiments: Il sert à armer le béton, renforcer les fondations, transporter l'eau et le gaz et d'autres fluides. Il permet également de former le squelette des bâtiments.

IV.5.2.3 Avantage d'utilisation de l'acier[108]

La capacité d'absorber l'énergie :

La structure en acier absorbe l'énergie sismique de manière à ce que les forces cycliques ne se transmettent pas à la structure. C'est le comportement ductile du matériau qui favorise la dissipation de l'énergie.

Matériau propre:

Un matériau durable et respectueux de l'environnement.

La résistance à la fatigue:

Capacité de l'acier à supporter un grand nombre de cycles et de charges avant rupture la possibilité de calculer au plus juste les degrés de ductilité et d'absorption d'énergie voulus.

IV.5.3 Les propriétés des mâtereaux utilisés dans notre simulation

Les Tableau IV.4: Prospérités thermo-physiques des matériaux utilisés [109]

<table>
<tr><td>Propriétés</td><td colspan="2">Particule : Aluminum</td><td colspan="2">Substrat: Acier</td><td>unité</td></tr>
<tr><td>Densité</td><td colspan="2">2570</td><td colspan="2">7800</td><td>[Kg/m³]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Viscosité (liquide)</td><td>Température (°C)</td><td>ν</td><td colspan="2" rowspan="2"></td><td rowspan="2">[m²/s]</td></tr>
<tr><td>0
700</td><td>4.5E-7
4E-7</td></tr>
<tr><td>Conductivité thermique</td><td colspan="2">70</td><td colspan="2">26</td><td>[W/m K]</td></tr>
<tr><td>Chaleur spécifique liquide</td><td colspan="2">1000</td><td colspan="2"></td><td>[J/Kg K]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Conductivité thermique
solide</td><td>Température (°c)</td><td>λ</td><td colspan="2" rowspan="2"></td><td rowspan="2">[W/m K]</td></tr>
<tr><td>400
500
630</td><td>144
147
70</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Chaleur spécifique</td><td>Température (°c)</td><td>Cp</td><td>Température (°c)</td><td>Cp</td><td rowspan="2">[J/Kg K]</td></tr>
<tr><td>100
300
400
570
580</td><td>400
500
800
1050
1038</td><td>20
200
500</td><td>460
502
550</td></tr>
</table>

IV.6 Identification du problème

1er cas:

Le problème que nous avons à traiter n'a pas de solution analytique qui permet d'avoir un résultat cartésien cependant, nous allons le résoudre à travers une approche itérative utilisant des fonctions incrémentées dans le logiciel de simulation utilisé et pour vérifier la crédibilité des résultats obtenus , nous allons les comparer comme dit précédemment avec les résultats de JAVAL MOSTAGHIMI et ses collègue[106].

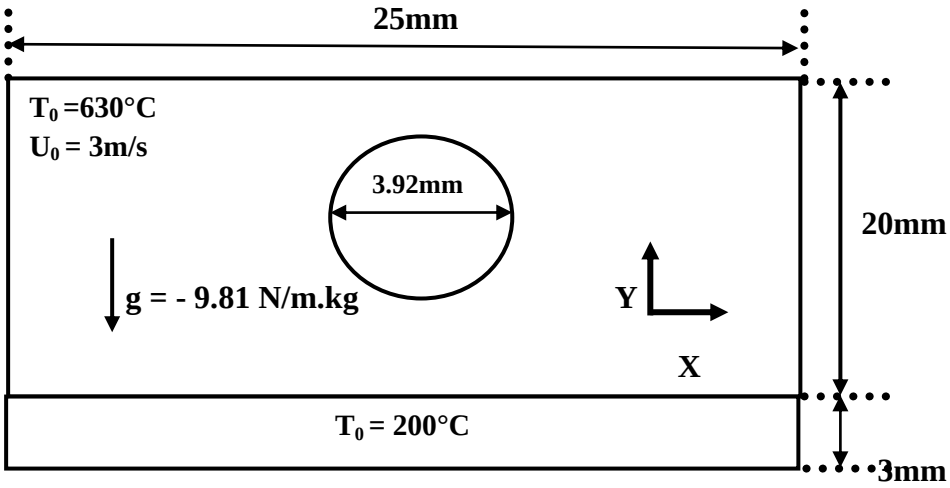


Figure IV.3: Configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification

- **Conditions initiales**

Tableau IV.5: Les conditions initiales d'étalement de L'identification

	la gouttelette	substrat
La température initiale	630°C.	200°C.
La vitesse	selon l'axe y est -3m/s	nulle 0m/s
Gravité	-9.81N/m.kg	/
Le maillage	0.0002	0.0002
Le pas de temps	0.00001 s	
Le temps total de simulation	0.001s	
La solution	en 2D	
Le nombre total des nœuds	29430 nœuds	
élément type model mathématique	Flotrant CFD 141	
Température ambiante	200°C	
Ecoulement	laminaire	
Transformation	Thermique avec changement de phase	
Régime	transitoire	

➢ Le maillage

La Figure IV.4 représente la géométrie de la particule d'aluminium qui va servir à revêtir le substrat d'acier dans un maillage discrétisé en éléments finis de 0,0002 mm.

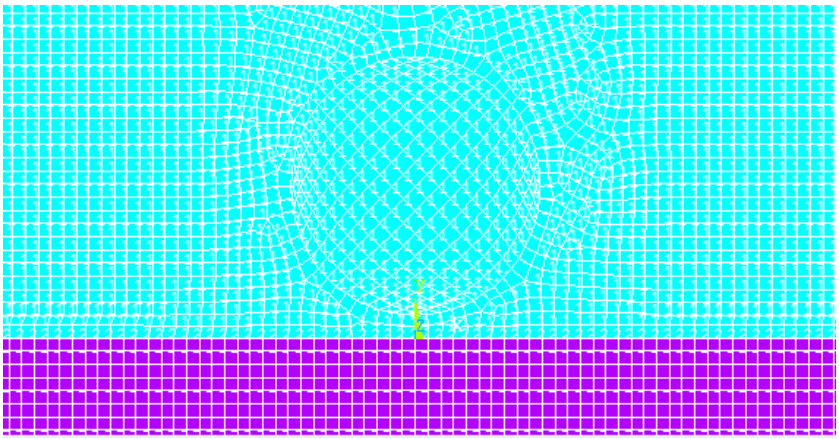


Figure IV.4**:** Le maillage d'une particule en aluminium dans un jet plasma et projetées sur un substrat

La section (a) de la figure IV.5 représente les résultats de la simulation effectuée par JAVAD-MOSTAGHIMI [106] tandis que la section (b) de la figure IV.6 illustre les résultats que nous avons obtenu à travers la simulation que nous avons effectué avec les mêmes conditions de JAVAD-MOSTAGHIMI [106].

Après comparaison des résultats de la figure IV.6 Nous avons déduit que nos résultats sont en bon accord avec les résultats de l'expérimentation de JAVAD-MOSTAGHIMI [106]. L'étalement et la goutte est semblable à l'étalement de la goutte de la simulation de JAVAD-MOSTAGHIMI[106]. au cours de l'impact, la gouttelette se propage symétriquement par rapport au point d'impact et glisse lentement sur le substrat jusqu'à l'étalement totale et le liquide suit la topographie de la surface.

On remarque que la gouttelette commence à se propager à t=0.1ms à partir du moment d'impact jusqu'à sa propagation totale à t=7ms.

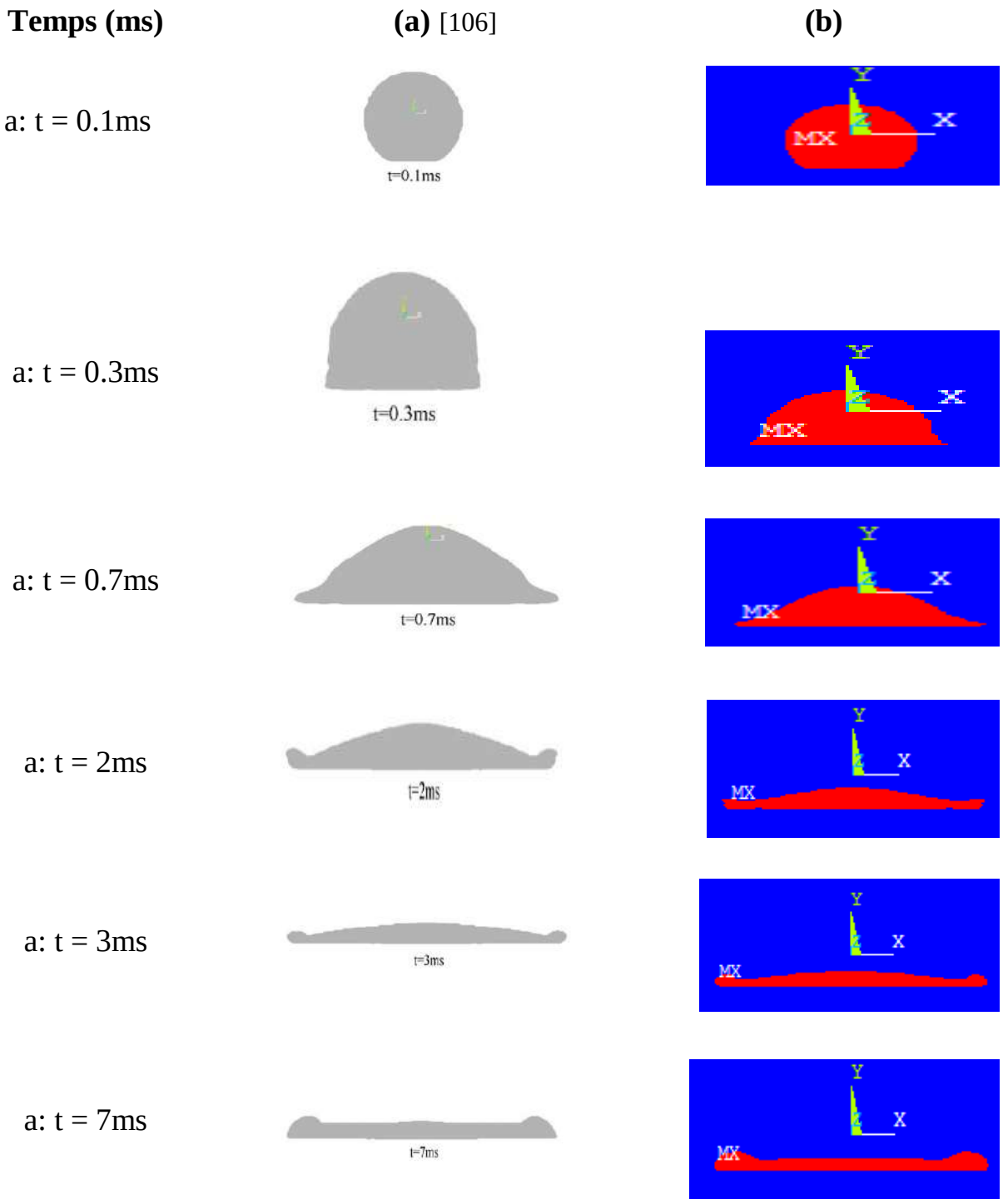
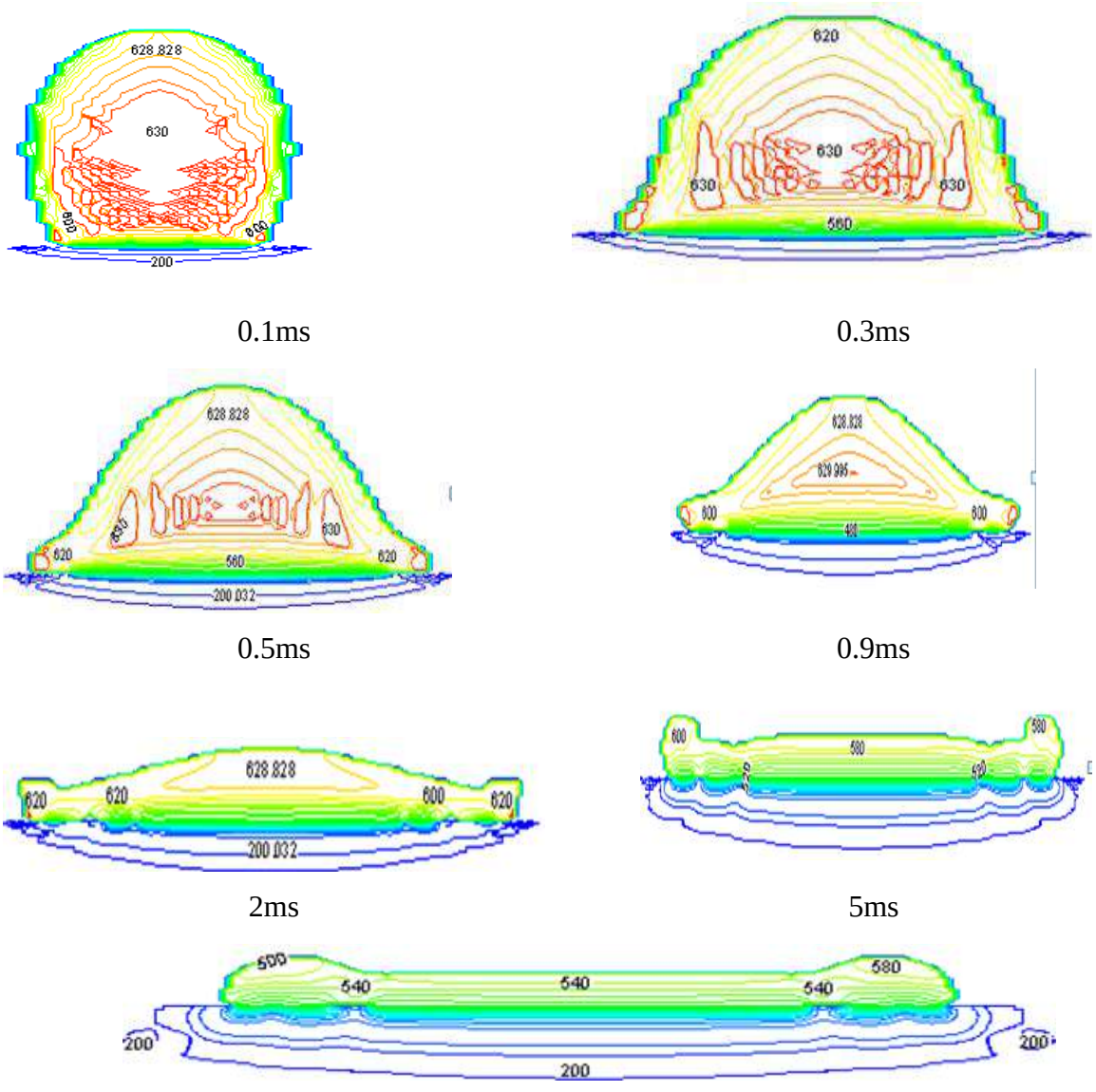


Figure IV.5: Impact d'une particule de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C

La figure IV.6 illustre une répartition spatiale de la température durant l'impact d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale V=3m/s et une température T=630°C sur un substrat en acier initialement à T=200°C. Après réflexion, nous avons constaté que les extrémités de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard. Le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les doigts à la périphérie de la lamelle formée se sont solidifiés en retard. Ceci est dû au flux radial et à la séparation à grande vitesse du principal bord de lamelle qui a réparti au dessus des aspérités du substrat.



0.1ms 0.3ms

0.5ms 0.9ms

2ms 5ms

7ms

La figure IV.6: Distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat a 200°C

➢ Comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions

La figure IV.7 montre deux graphiques qui sont les facteurs d'étalement en fonction du temps de la goutte d'aluminium, l'un obtenu via notre simulation tandis que le deuxième fut obtenu avec la simulation de JAVAD MOSTAGHMI [106] et les autres auteurs.

Nous avons constaté qu'au sein de l'expérience de MOSTAGHIMI [106], la valeur maximale qu'atteint le facteur d'étalement de la particule est de 3.27 tandis que la valeur maximale que nous avons obtenu via notre simulation est de 3.1; Cette légère différence est due au changement de la valeur de la viscosité de la particule que nous avons délibérément modifiée afin d'analyser l'effet de ce paramètre sur l'étalement. Cependant l'évolution des deux graphiques se fait dans une parfaite symbiose, c'est ce qui indique la fiabilité des résultats obtenus au cours de notre simulation. En premier lieu on note que les deux facteurs augmentent rapidement depuis l'instant 0.3 jusqu'à la valeur de 2.5, nous constatons aussi que le facteur de MOSTAGHIMI [106] coïncide avec notre model à t=0ms; t=2ms; t=3ms et t=3.5ms, puis à l'instant t=7ms, la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement finale.

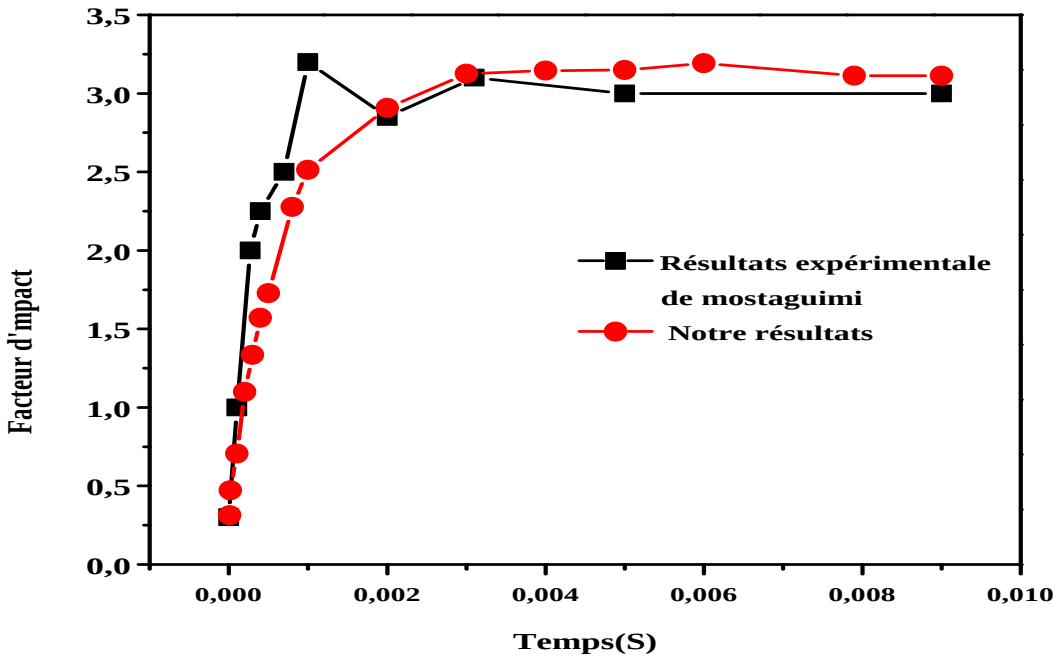


Figure IV.7**:** Facteurs d'étalement.

❖ 2ème cas

Dans cette partie nous allons effectuer une simulation avec deux particules l'une sera identique à celle de la simulation précédente tandis que la deuxième sera pénétrée par une bulle d'air avec les proportions suivantes (0% - 25% -50% -75%) puis étudier la dynamique, la thermique, et la morphologie de l'étalement de la particule sur substrat.

- **Description du domaine d'application**

Les mêmes dimensions précédentes seront gardées pour les deux particules; la distance entre les deux particules est égale au diamètre de la particule multipliée par quatre ($3.92 \times 4 = 15.68mm$) Pour la disposition des deux gouttes, elles seront parallèles l'une à l'autre.

La Figure IV.8 (a) représente les dimensions de la géométrie étudiée avec 0% de présence d'air tandis que la Figure IV.8 (b) représente la géométrie avec 75% de présence d'air.

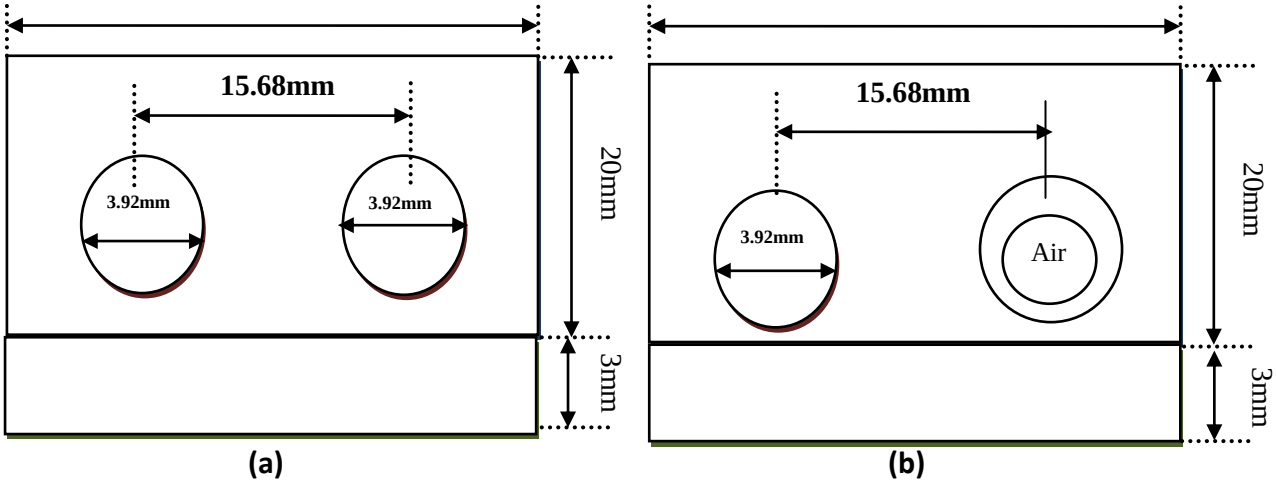


Figure IV.8: représentation des dimensions des deux géométries étudiées.

- **Condition initial**

Tableau IV.6: Les conditions initiales pour le Rrefroidissement de la particule.

	Gouttelette1	Gouttelette2	substrat
Pourcentage de matériaux	100% aluminium [Al].	100% = aluminium [Al]. 25% = air et 75% = [Al]. 50%= air et 50% = [Al]. 75% = air et 25% = [Al].	100% Acier.
La vitesse	selon l'axe y est -3m/s	selon l'axe y est -3m/s	nulle (0m/s)
Gravité	-9.81N/m.kg		/
Température	630°C		200°C

➢ Le maillage

La figure ci-dessous, représente le maillage effectué en éléments finis pour la géométrie des deux particules d'aluminium utilisées dans le jet de plasma qui fut projeté sur le substrat d'acier.

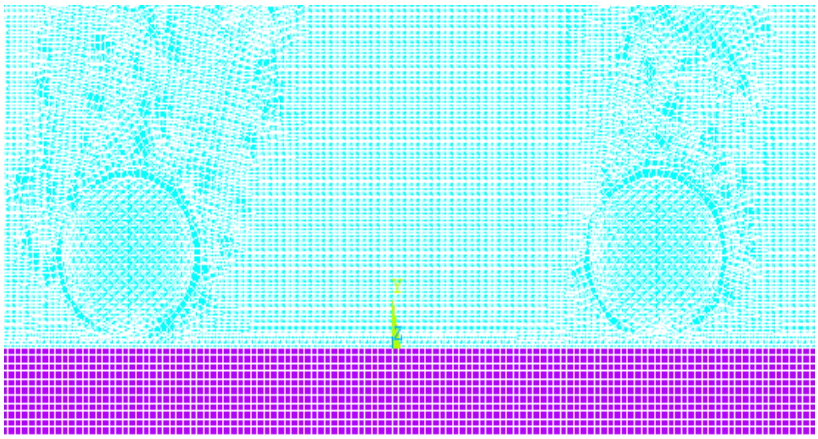


Figure IV.9**:** le maillage de deux particules en aluminium sur un substrat en acier.

Les deux figures (IV.10 et IV.11) montrent respectivement les points de capture de température et le point de capture de pression qui feront l'objet d'analyse de la simulation.

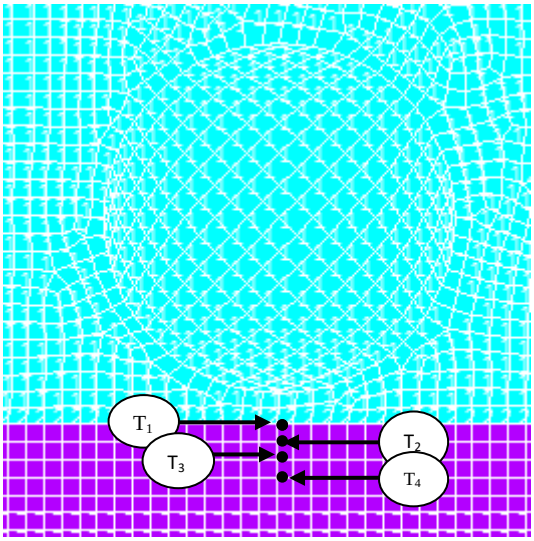


Figure IV.10: Points de capture des températures.

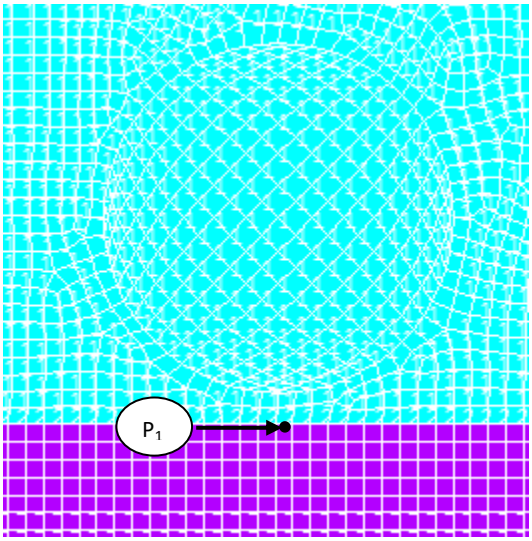


Figure IV.11: Point de capture de la pression.

Pour chaque simulation nous allons tracer les résultats obtenus de la simulation dans des graphiques et les interpréter en étudiant la variation de pression au point d'impact et des profiles de température puis nous allons comparer ces deux paramètres pour chacune des simulations.

IV.7 Exposition des résultats de la simulation

Les graphiques tracés représenteront la variation de la pression et de la température du substrat en fonction du temps.

IV.7.1 Pour un taux de présence d'air à 0%

- **La variation de la pression en fonction du temps**

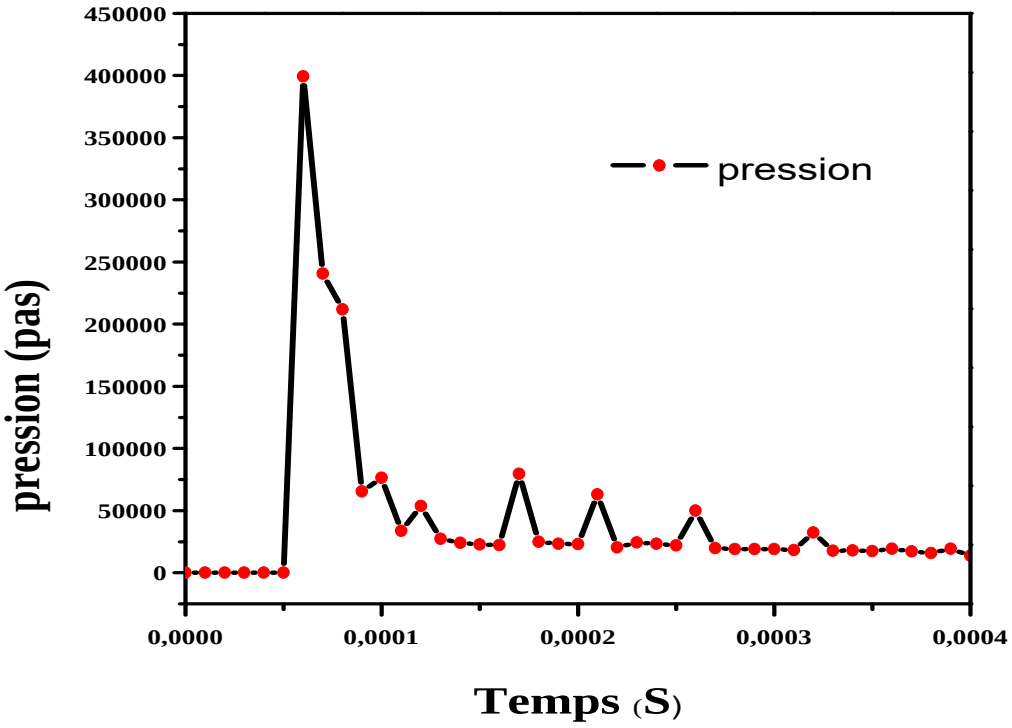


Figure IV.12**:** La variation de la pression au point d'impact (particule/substrat) en fonction de temps pour la présence de 0 % d'air.

La courbe illustre le champ de pression au point d'impact de la goutte d'aluminium sur le substrat au cours de son étalement en fonction du temps, juste au moment de l'impact particule/substrat, la pression fait un pique de 400KPa ce qui justifie une bonne adhérence de la lamelle d'aluminium sur la surface du substrat, puis cette pression diminue brusquement et connait quelques fluctuations jusqu'à prendre une valeur nulle en fin d'étalement. Ceci est dû au transfert d'énergie thermique qui a eu lieu entre la goutte d'aluminium et le substrat, ce qui a usé de l'énergie mécanique de la goutte d'aluminium.

Profile de température en fonction du temps

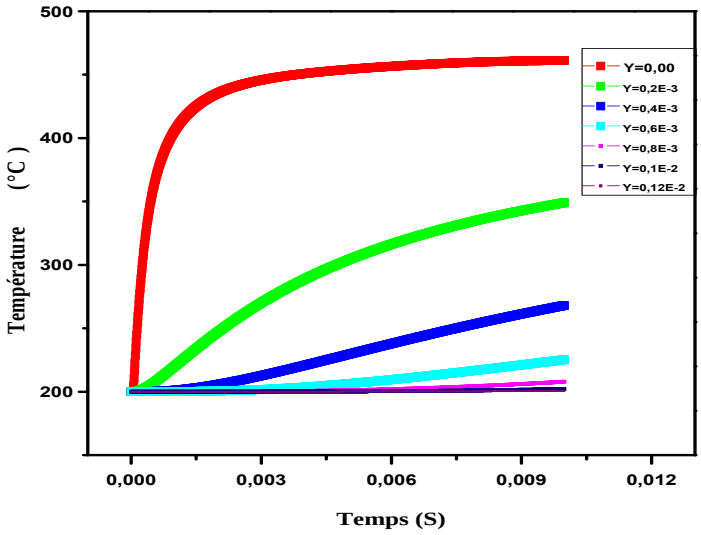


Figure: IV.13: Profiles de température en fonction du temps pour la présence de 0 % d'air Pour sept positions dans le substrat.

Concernant la propagation de la chaleur dans le substrat sur le meme axe de l'impact, elle va en décroissant depuis la surface du substrat où elle est égale à 470 °C jusqu'à sa base où elle atteint 210°C qui est presque égale à sa température initiale du fait que ce dernier possède une épaisseur, ce qui limite le transfert de chaleur et donc on peut dire qu'aux tous premiers instants de contact de la goutte avec la cible, la température du substrat au point d'impact augmente rapidement cependant la Resistance thermique diminue, Après un étalement partiel, la surface de contact entre le substrat et la goutte augmente et la température de la goutte reste quasi-constante alors que celle du substrat augmente beaucoup plus lentement tandis que la température de surface de la goutte s'abaisse. La résistance de contact associée augmente pour atteindre son maximum à la fin de l'étalement.

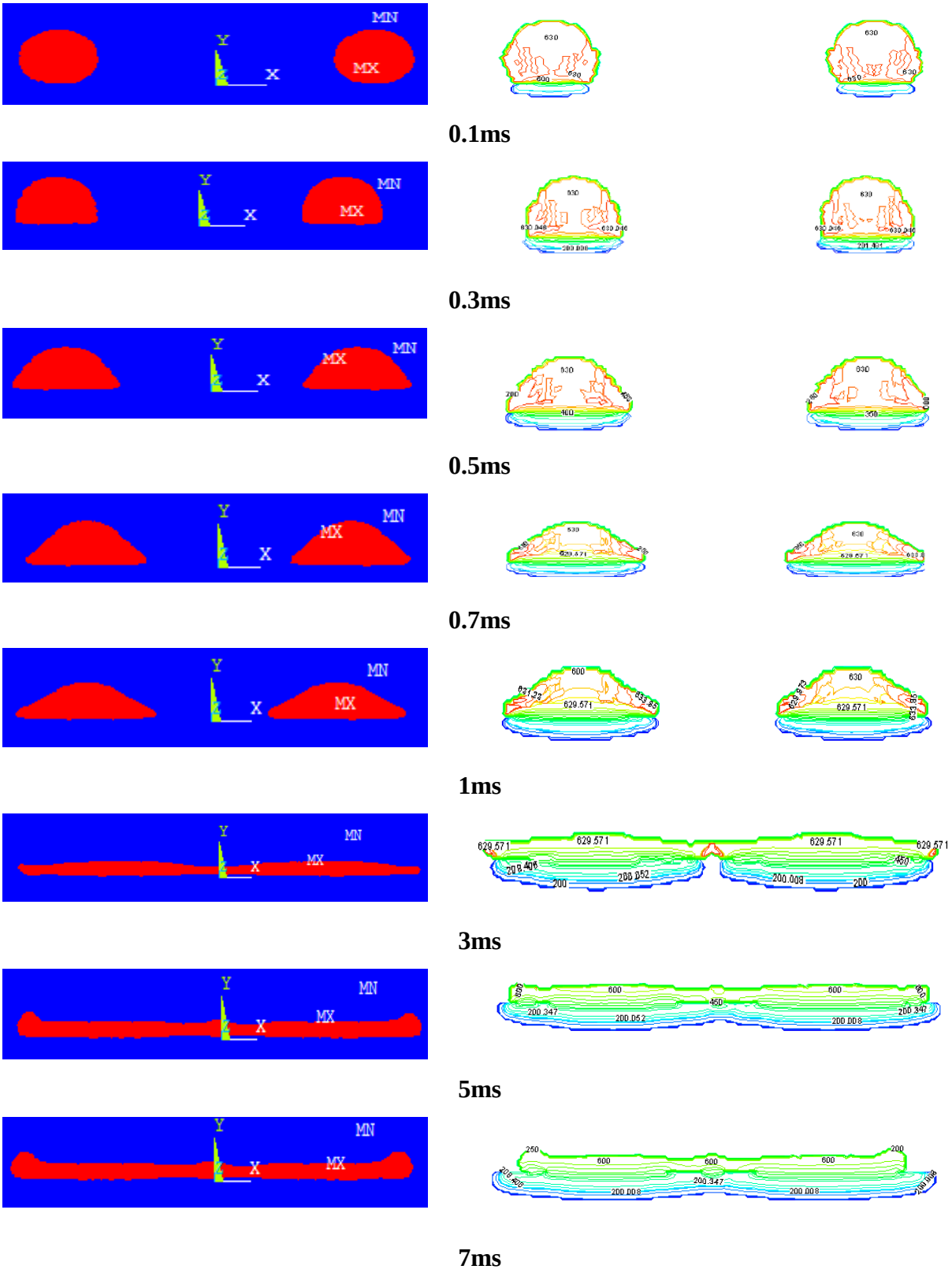


Figure IV.14**:** distribution de la température lors de l'impact de la goutte avec un taux de présence d'air à 0%

IV.7.2 Pour une goutte d'aluminium avec un taux de présence d'air à 25%

- **Profile de température en fonction du temps:**

La figure IV.15 montre les profils de température obtenus via la simulation numérique des cinq nœuds indicateurs choisis au sein du substrat et on note que ;

- Au point d'impact de la goutte avec le substrat, soit le premier nœud ; la température de celui-ci augmente pour atteindre 470°C puis elle se stabilise et reste constante.
- Pour le deuxième nœud, la température s'élève un peu jusqu'à 300°C puis se stabilise.
- Pour le restant des nœuds la température décroit progressivement jusqu'à atteindre la température de base du substrat, soit T=200°C.

Ceci est dû au faible coefficient de transfert thermique du substrat, ce qui n'améliore pas le transfert thermique.

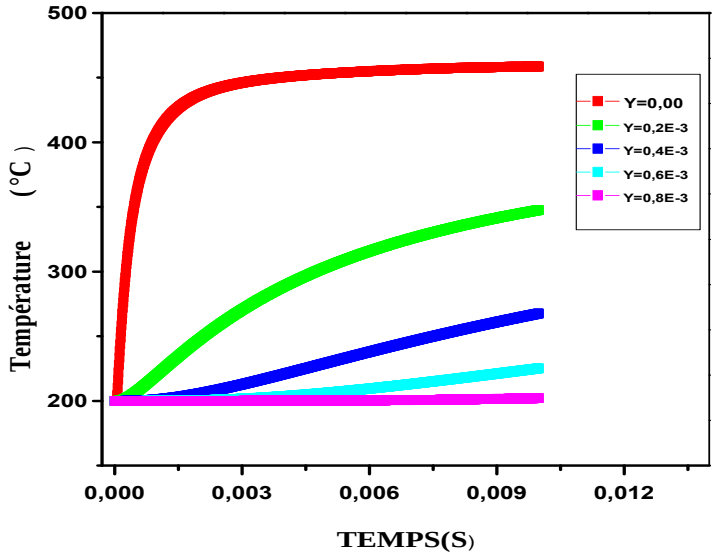
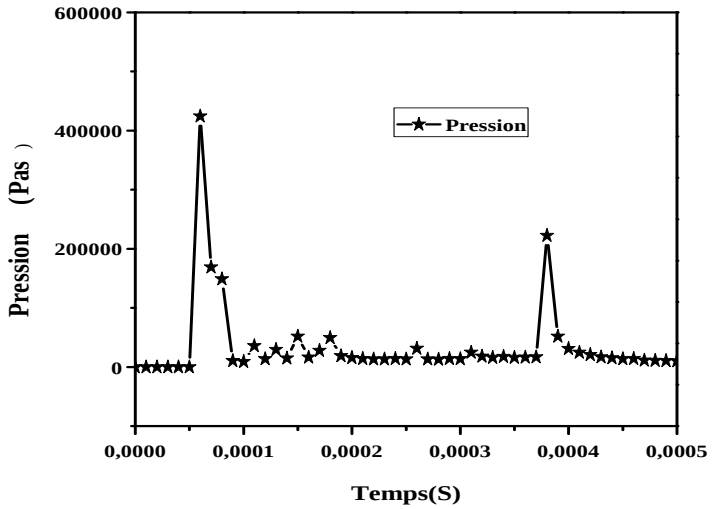


Figure IV.15**:** profiles de température en fonction de temps dans le cas de 25 % d'air

- **La variation de la pression en fonction de temps**

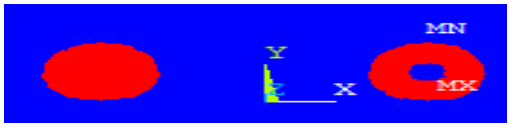
La figure IV.16 représente le tracé des résultats numériques de la variation de pression le long du substrat, la pression au point d'impact atteint 400000.Pas à t=0.1ms ensuite elle diminue brusquement pour atteindre 246200.Pas et reste constante un bon moment jusqu'à t=0.4ms où elle grimpe à 200000.Pas puis refait une chute et se stabilise.

Ceci est probablement dû à la viscosité de la goutte d'aluminium qui provoque des fluctuations au sein de la dynamique de la lamelle pendant son étalement sur le substrat.



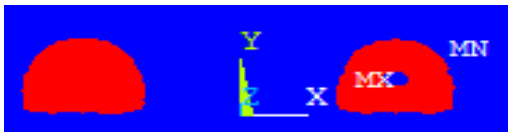
La Figure IV.16**:** La variation de la pression au point d'impact (particule/substrat) en fonction de temps dans le cas 25 % de présence d'air.

La figure IV.17 et la figure IV.18 montrent respectivement, d'une part la dynamique des deux gouttes d'aluminium l'une creuse et la deuxième pleine et d'autre part le profil thermique de ces gouttes.



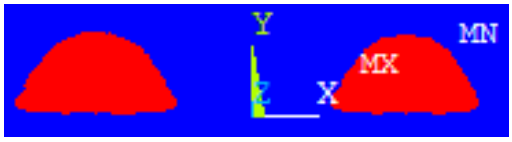


0.1ms



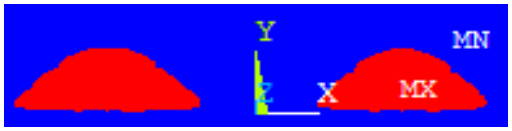


0.3ms



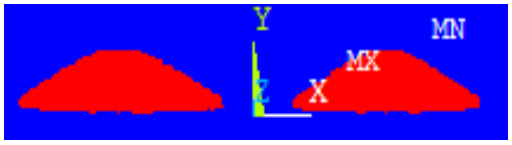


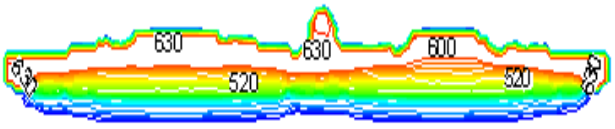
0.5ms



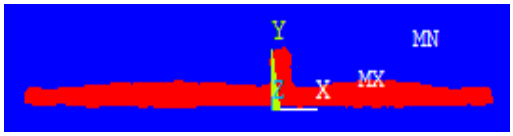


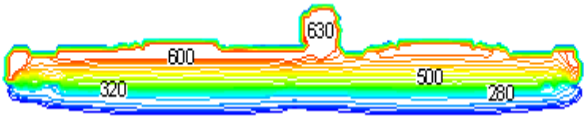
0.7ms



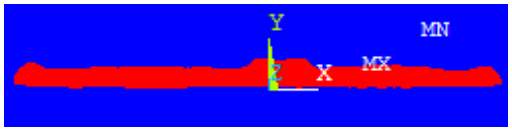


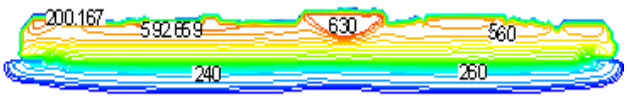
2ms





5ms





7ms

Figure IV.17**:** la dynamique de la particule au cours d'étalement.

Figure IV.18**:** la thermique de la particule au cours d'étalement.

IV.7.3 Pour un taux de présence d'air à 50%

- **Profile de température en fonction du temps**

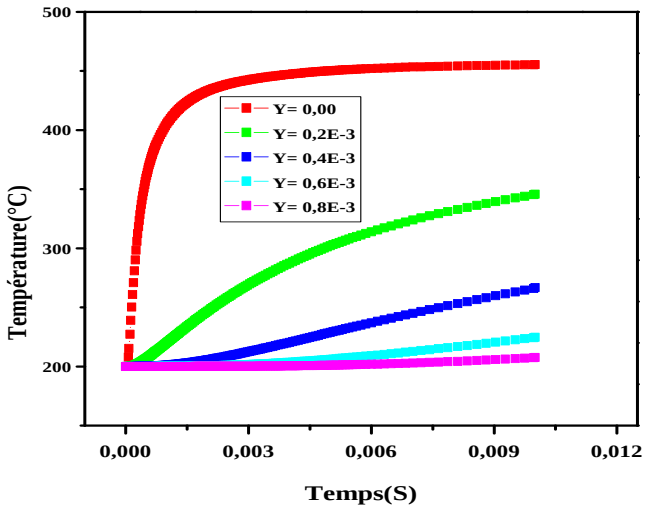


Figure IV.19**:** profile de température en fonction de temps dans le cas de 50 % d'air.

La chaleur dans le substrat sur le meme axe de l'impact va en décroissant depuis la surface du substrat jusqu'à sa base, au premier instant lors du premier contact de la goutte avec le substrat, la température de celui-ci au point d'impact augmente rapidement pour atteindre un maximum de 450°C puis elle se stabilise et reste constante. En ce qui concerne le deuxième point, la température s'élève et garde la même allure. Pour le restant des nœuds la température décroit progressivement jusqu'à atteindre la température de base du substrat, soit T=200°C.

- **La variation de la pression en fonction du temps**

La Figure IV.20 Illustre la distribution de la pression au point d'impact en fonction du temps, le graphique se caractérise par deux pics l'un à t= 0.1 ms où la pression atteint les 300000.Pas , et l'autre à t=0.6 ms où la pression équivaut à 200000.Pas , ce qui prouve que la goutte s'est bel et bien écrasée sur le substrat, mais à t=0.2ms, t=0.4ms, t=0.8ms la pression est presque nulle, ce qui explique un mauvais accrochage mécanique.

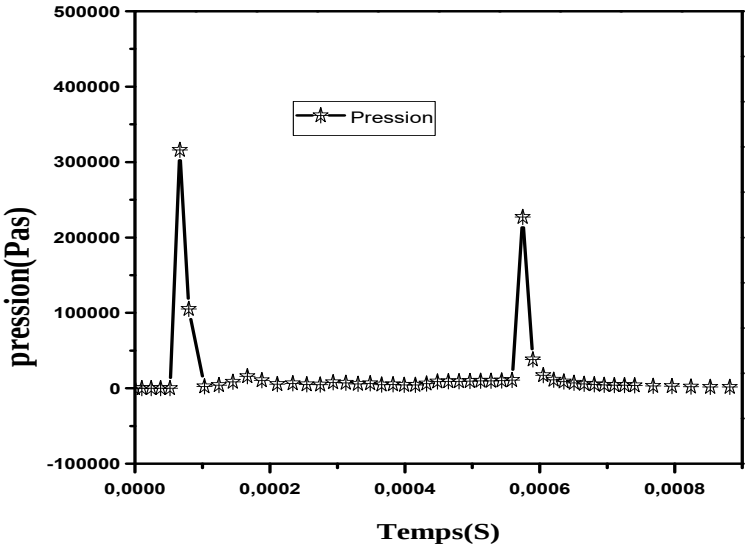


Figure IV.20**:** la variation de la pression au point d'impact en fonction de temps Dans le cas 50% de présence d'air.

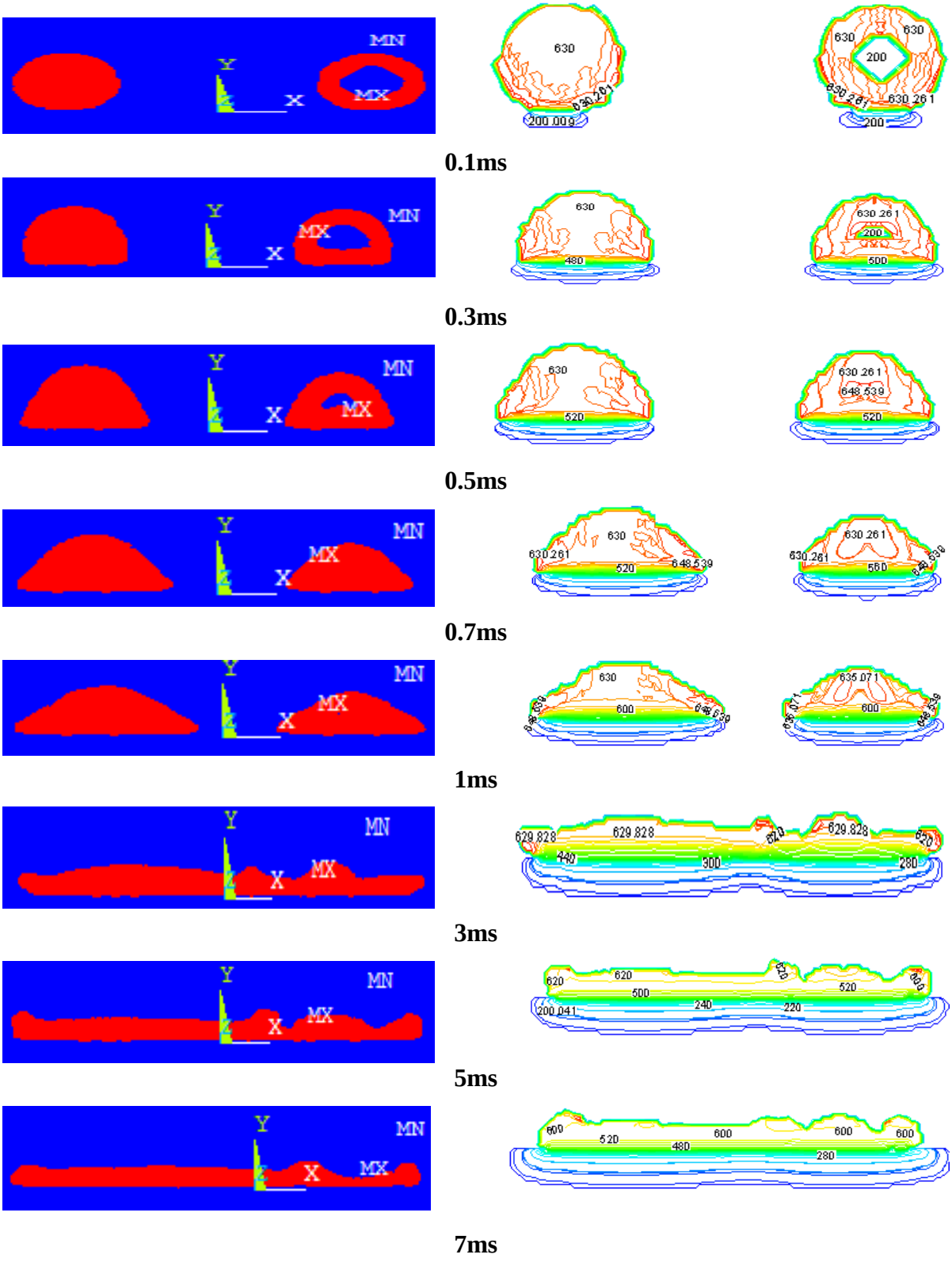


Figure IV.21: la dynamique de la particule au cours d'étalement à 50%.

Figure IV.22: la thermique de la particule au cours d'étalement à 50%.

IV.7.4 Pour un taux de 75% d'air

- **Profile de température en fonction du temps**

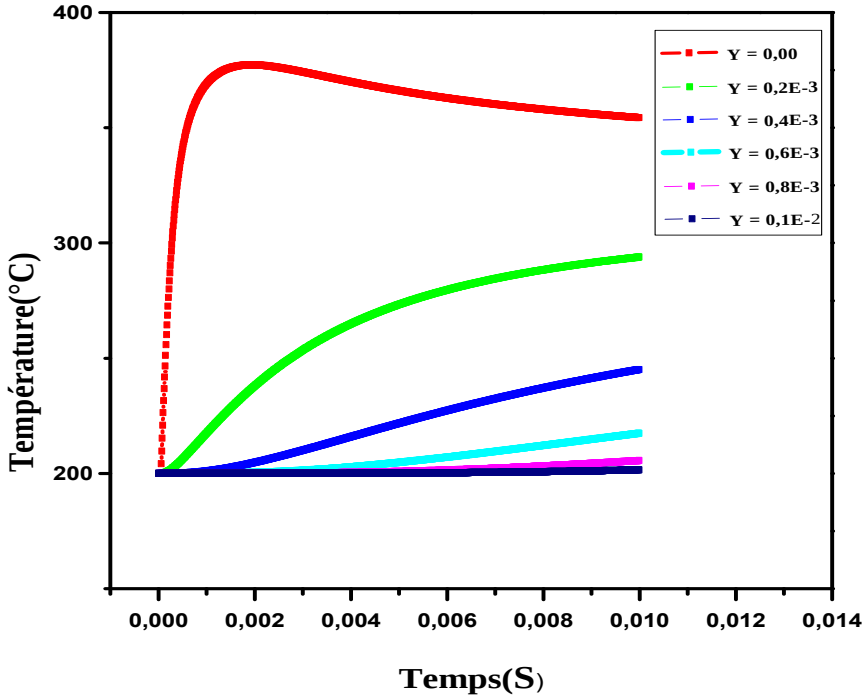


Figure IV.23**:** profile de température en fonction de temps dans le cas de 75 % d'air.

D'après Figure IV.23 on observe qu'aux tous premiers instants de contact de la goutte avec le substrat, la température du substrat au point d'impact augmente brusquement pour atteindre 370°C et diminue juste après jusqu'à 320°C et se stabilise. Le deuxième nœud analysé connait une augmentation de température qui atteint les 270°C avec une allure assez douce. Pour les autres nœuds traités, la température décroit progressivement jusqu'à atteindre la température de base du substrat, soit T=200°C.

➢ La variation de la pression en fonction du temps

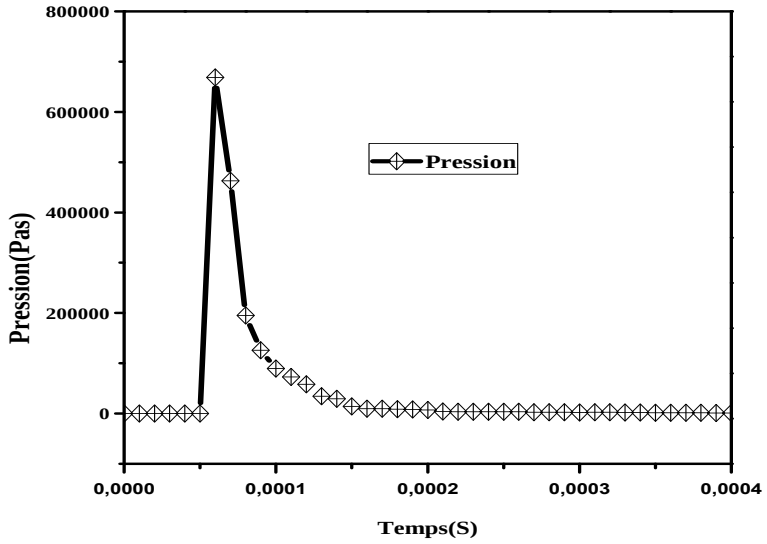
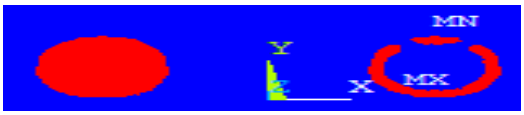
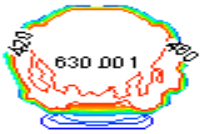


Figure IV.24**:** la variation de la pression au point d'impact en fonction de temps dans le cas 75% d'air.

La Figure IV.24 comporte les résultats numériques du profil de pression au point de contact. Nous voyons initialement que la pression est plus élevée au point d'impact et est de l'ordre de 6300000.Pas ce qui montre une bonne adhérence goutte/substrat puis elle se neutralise vers le zéro très rapidement car la force mécanique de l'impact est vite consumée après l'impact.

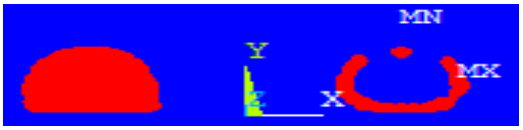
Remarque: après réflexion, on remarque que le transfert de chaleur est relativement lié à la pression. Quand cette dernière augmente, le transfert thermique se fait mal tandis que quand elle diminue ce dernier se fait convenablement et la température à la surface diminue progressivement.

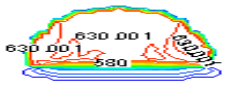






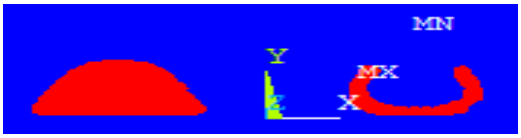
0.1ms







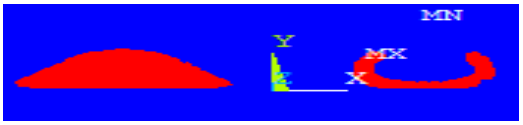
0.3ms

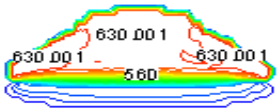






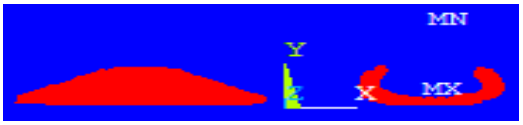
0.5ms







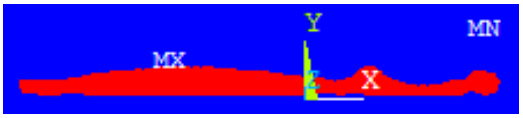
0.7ms

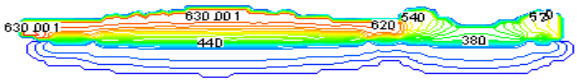




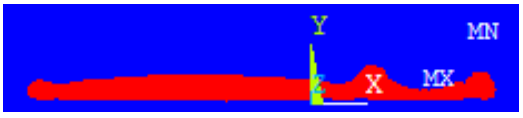


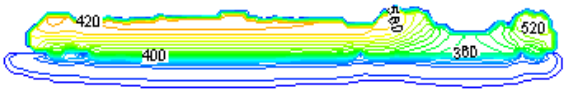
2ms



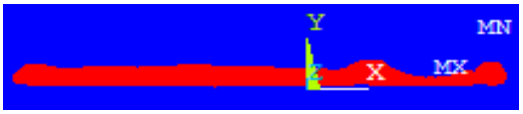


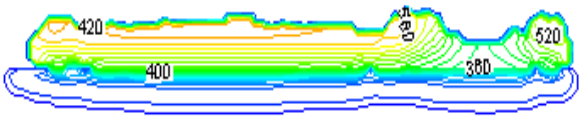
3ms





5ms





7ms

La figure IV.25**:** la dynamique de la particule au cours d'étalement à 75%.

La figure IV.26**:** la thermique de la particule au cours d'étalement à 75%.

IV.7.5 Comparaison des résultats pour les différents taux de présence d'air (0% - 25% - 50% -75%)

- **Pour les profils de température en fonction du temps:**

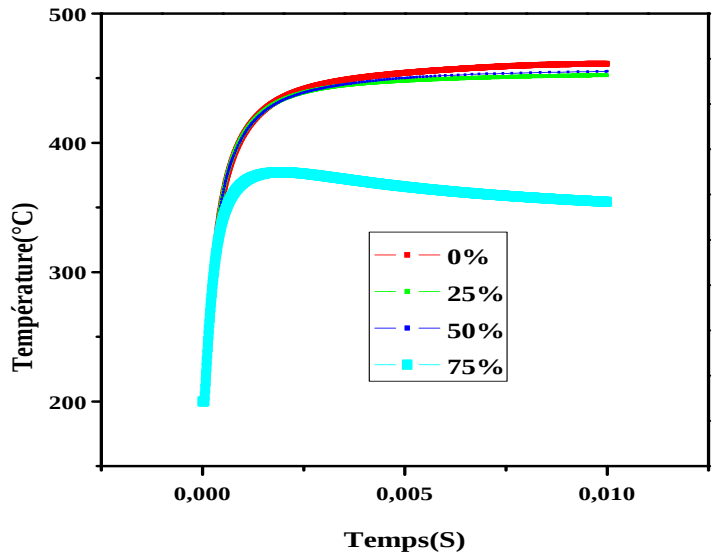


Figure IV.27**:** Comparaison entre les profiles de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas de présence d'air.

Nous avons étudié la variation de la température du substrat au point d'impact pour les quatre cas d'interactions goutte/substrat.

Au premier cas la goutte ne comportait pas de bulle d'air, ce qui a infligé un grand gradient de température sur le substrat tandis que pour le deuxième et troisième cas où la goutte était en présence d'air avec une proportion de 25% puis de 50%, le changement de température n'était pas vraiment important et reste comparable au cas de la goutte qui n'était pas pénétrée par une bulle d'air, ce qui change dans le quatrième cas où la goutte fut pénétrée par une bulle d'air à 75% de sa proportion, où l'on observe une baisse importante de la température du fait que la bulle d'air a pris la plus grande majorité de la proportion de la goutte d'aluminium ce qui a infligé un refroidissement rapide de la lamelle.

➢ **Pour les pressions:**

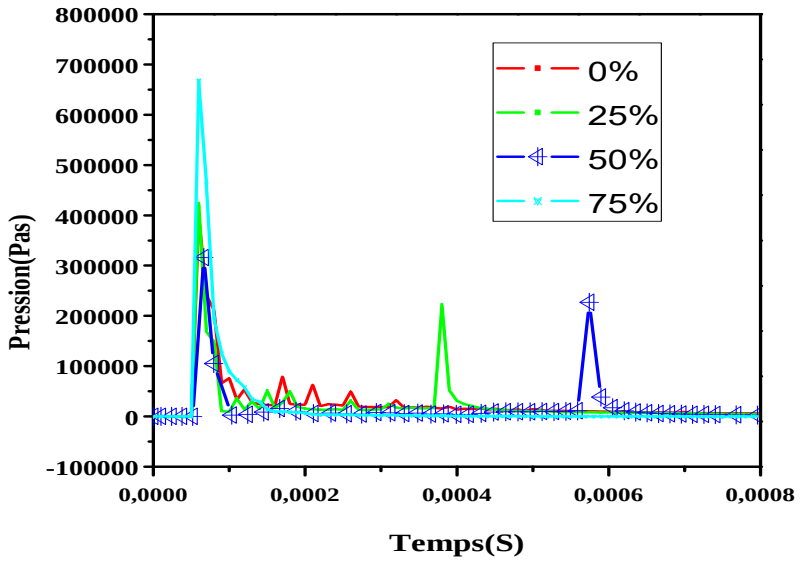


Figure IV.28**:** Comparaison de la variation de la pression Pour les quatre cas de présence d'air.

La figure (IV.28) représente une comparaison de la variation de pression au point de contact entre le substrat et les deux particules en aluminium pour les quatre cas de présence d'air dans la particule. On note ici que le premier point d'impact substrat/particule comporte le taux de pression maximal de tous les cas mentionnés, tel qu'à t=0.1ms les pressions maximales pour chaque cas traité sont égales à:

Pour 0%: P_{max} = 400000 Pas

Pour 25%: P_{max} = 400000 Pas

Pour 50%**:** P_{max}= 300000 Pas

Pour 75%: P_{max}=630000 Pas

La zone ou il ya une bonne adhérence de lamelle sur le substrat est celle où il y a une grande pression, On distingue aussi qu'il ya deux pics de pression pour 25% et 50% par contre à 0% et à 75% La pression tend vers zéro très rapidement, donc au début de l'étalement la pression fait un pic de 630000 Pas mais lors de la fin de l'étalement elle d'estompe jusqu'a devenir nulle pour les quatre cas car l'énergie mécanique des gouttes fut transférée au substrat, et donc la particule perd de son énergie interne.

Figure IV.39: Comparaison entre les 4 cas de taux de présence d'air.

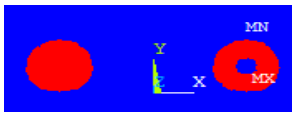
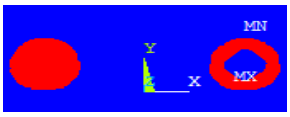
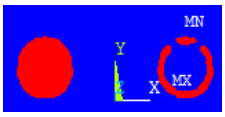
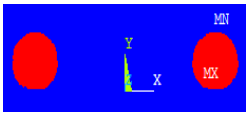
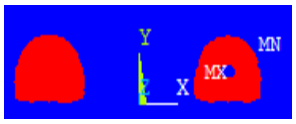
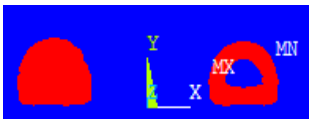
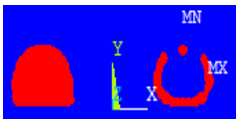
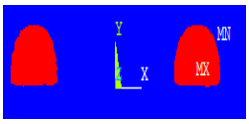
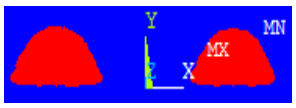
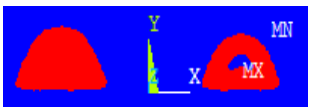
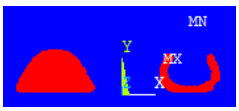
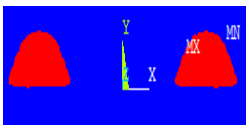
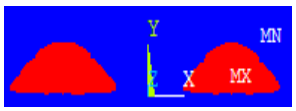
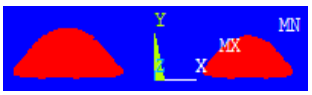
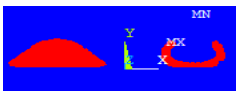
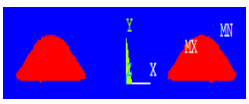
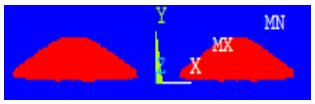
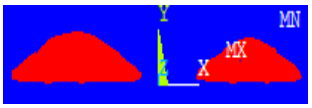
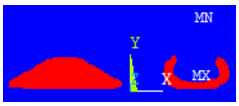
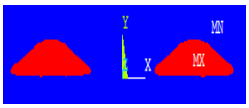
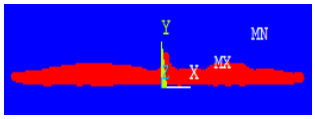
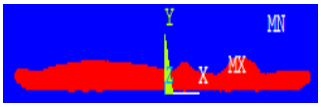
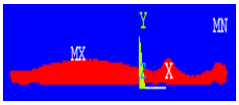
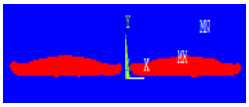
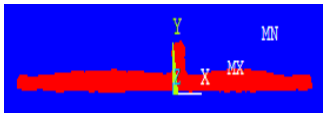
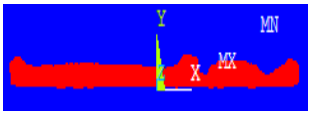
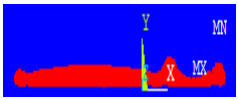
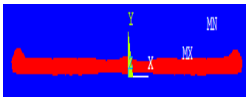
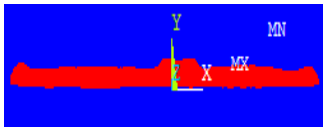
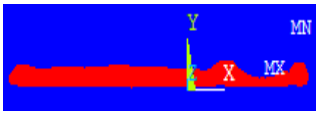
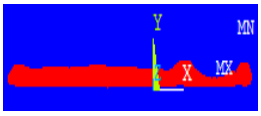
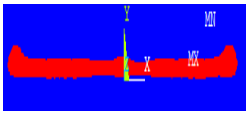
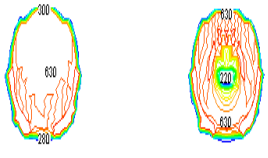
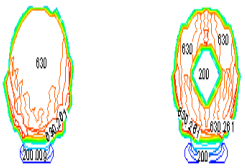
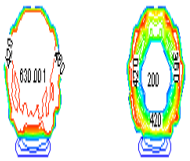
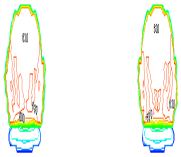
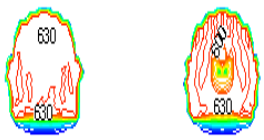
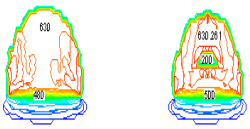
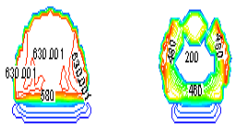
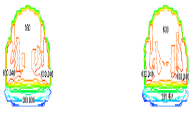
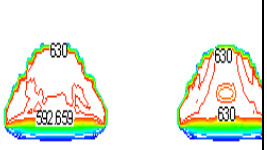
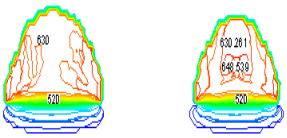
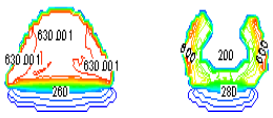
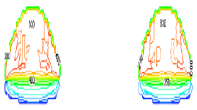
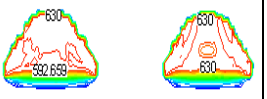
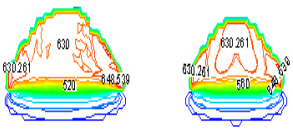
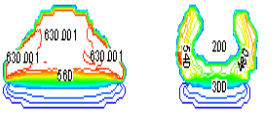
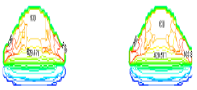
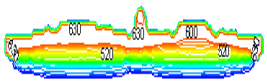
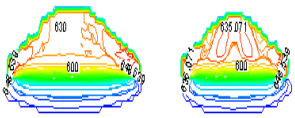
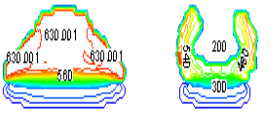
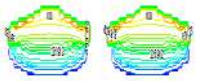
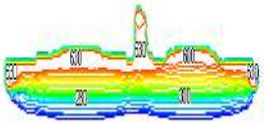
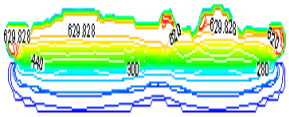
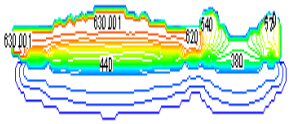
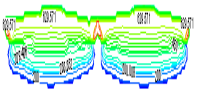
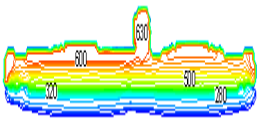
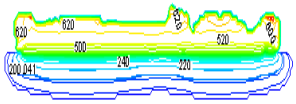
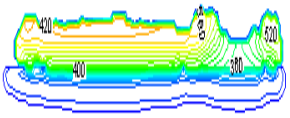
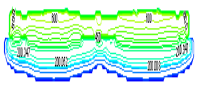
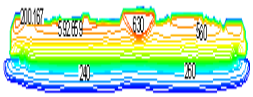
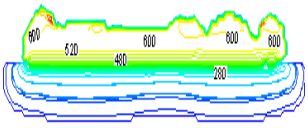
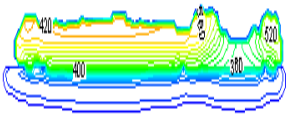
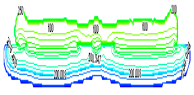
T \ %	25 %	50%	75%	0%
0.1ms				
0.3ms				
0.5ms				
0.7ms				
1ms				
3ms				
5ms				
7ms				

Tableau IV.7**:** Comparaison des profiles de température des quatre cas pour pourcentage d'air.

% / T	25%	50%	75%	0%
0.1ms				
0.3ms				
0.5ms				
0.7ms				
2ms				
3ms				
5ms				
7ms				

Le Tableau IV.7 présente la Comparaison des profiles de température des quatre cas de présence d'air étudiés. Durant l'étalement, la convection thermique dans la goutte joue un rôle important en raison des fortes vitesses tangentielles sur une faible épaisseur. Pendant cette étape, la chaleur est fournie continuellement au point d'impact, ce qui à la fois réchauffe le substrat et refroidit le fluide en étalement mais maintient la température de la goutte au point d'impact. C'est pourquoi on observe que la température de la goutte est au même instant plus haut au point d'impact et plus faible dans la zone d'étalement, Dans le substrat, la chaleur provenant de la goutte se diffuse par conduction. Le point le plus chaud se situe sous la zone d'impact près de la surface.

3eme cas

On essayera différents angles de jet de plasma en variant son gradient de vitesse selon les axes X et Y, et on répète les mêmes étapes pour tous les angles (5°, 7.4°, 9°), on effectue la simulation numérique pour chaque cas et nous allons prendre le résultat final à l'instant t=7m/s.

$$\sqrt{(X)^2 + (Y)^2} = (3^2)$$

$$\mathrm{Tg}\,\alpha = \frac{V_X}{V_Y} \; Avec \; V_X = V.\sin\alpha \; et \; V_Y = V.\cos\alpha$$

$$Arc\,\mathrm{tg}\,\alpha = \alpha°$$

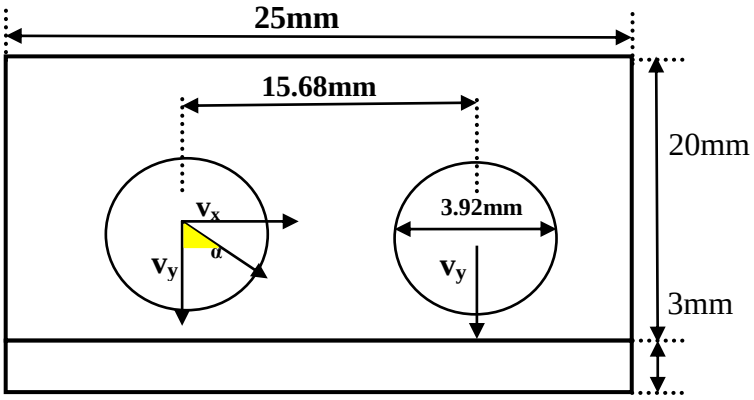


Figure IV.30**:** représentation des dimensions de géométrie étudiée.

Tableau IV.8: représentation les variations des vitesses étudiée.

	α = 5°	α = 7.4°	α = 9°
v_x [m/s]	0.3	0.5	0.45
v_y [m/s]	-2.9	-2.7	-2.8

Pour: α = 5°:

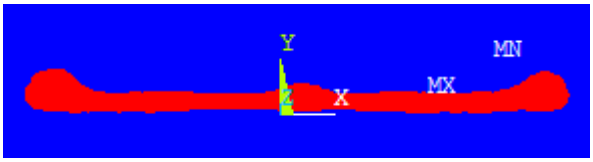


Figure IV.31: Schéma représente de l'étalement pour α=5° à t = 7ms.

La lamelle, une fois étendue sur le substrat, se présente sous la forme de couronne. MOSTAGHIMI [106] et ses collaborateurs [21, 23, 58, 97] ont suggéré que le début de solidification de la particule intervenait à la fin de l'étalement et par conséquent pouvait provoquer un phénomène d'éjection sur les zones périphériques avec formation des doigts de matière.

- **Profile de température en fonction de temps**

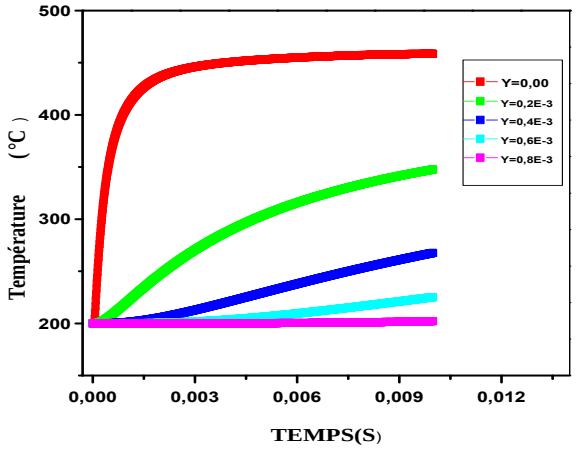


Figure IV.32: profiles de température en fonction de temps Pour α = 5°.

D'après le graphique tracé pour un jet en oblique de 5° d'angle, la température au premier nœud indicateur choisit atteint un maximum de 450 °C tandis que le deuxième nœud son maximum est de 350 °C puis pour le restant des nœuds la température décroit jusqu'à atteindre la température initiale du substrat pour une épaisseur de 0,8 mm.

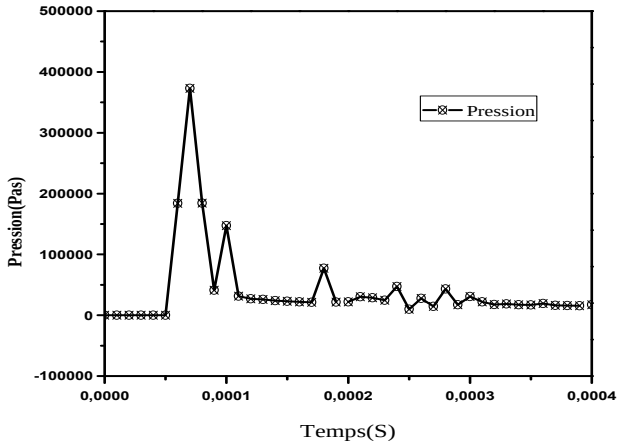


Figure IV.33: variation de pression en fonction de temps Pour α = 5°.

Apres l'impact des gouttes sur le substrat, il y a toujours une variation de pression le long du Substrat, la figure (IV.30) montre qu'au moment de l'impact la pression fait un pique de 350000.Pas ce qui justifie une bonne adhérence de la lamelle sur le substrat puis la pression diminue et connait quelques fluctuations, et enfin la pression diminue jusqu'à devenir nulle.

Pour: α = 7.4°:

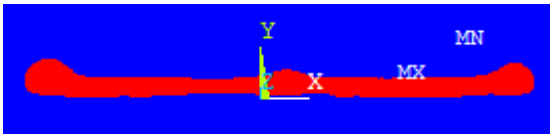


Figure IV.34: Schéma représente de l'étalement pour α=7.4° a t = 7ms.

On remarque que la particule s'est bien étalée sur le substrat sans être éclaboussée et avec une formation de doigts sur la périphérie de la lamelle, ceci s'explique par une variation adéquate de la viscosité.

- **Profile de température en fonction de temps**

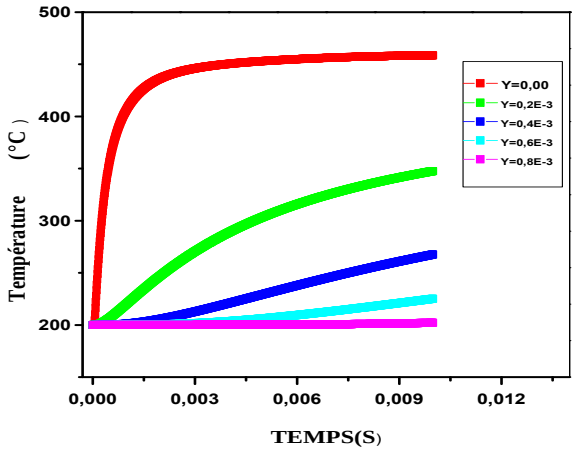


Figure IV.35: Profiles de température en fonction de temps Pour α = 7.4°.

- **Variation de pression en fonction du temps:**

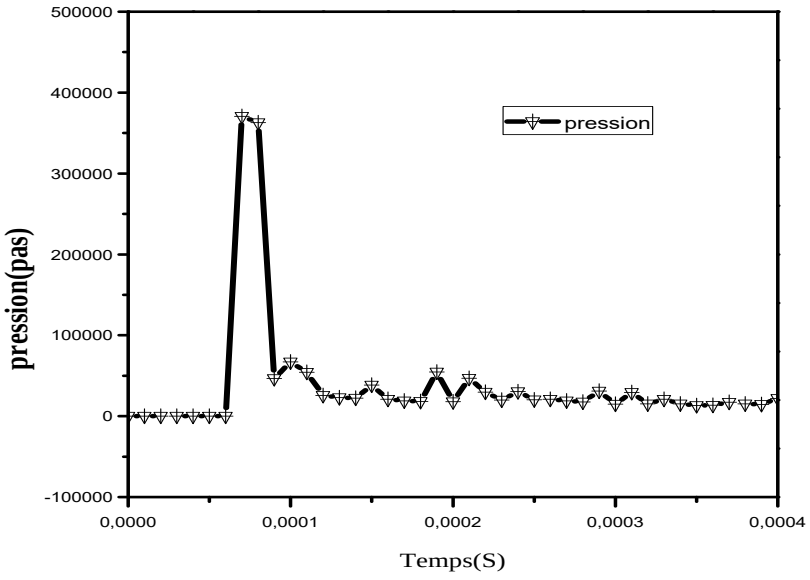


Figure IV.36: Variation de pression en fonction de temps Pour α = 7.4°.

Pour : α = 9.1°:

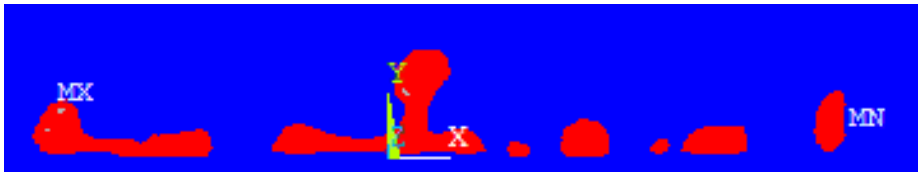


Figure IV.37**:** Schéma représente de l'étalement pour α =9.1° à t = 7ms.

La particule se déstabilise et se fractionne Une partie de la matière reste au point d'impact et des digitations apparaissent à la périphérie de la goutte initiale quand les effets inertiels sont majoritaire devant les effets de tension superficielle, ce qui peut se exprimer par une faible viscosité, ou encore une forte vitesse, La température du substrat peut également influencer ce comportement [108], puisque la viscosité et la tension superficielle du fluide diminuent lorsque la température augmente, ce qui accentue les instabilités lors de l'impact Ce phénomène nommé splash (éclatement de la particule).

- **Variation de pression en fonction de temps:**

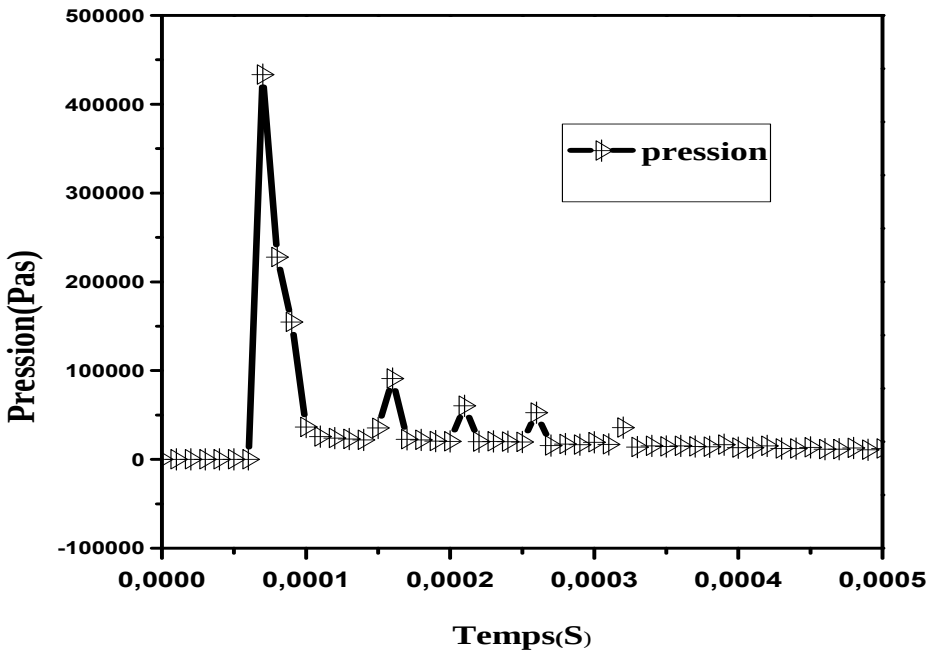


Figure IV.38: Variation de pression en fonction de temps Pour α = 9.1°.

➢ **Profile de température en fonction de temps:**

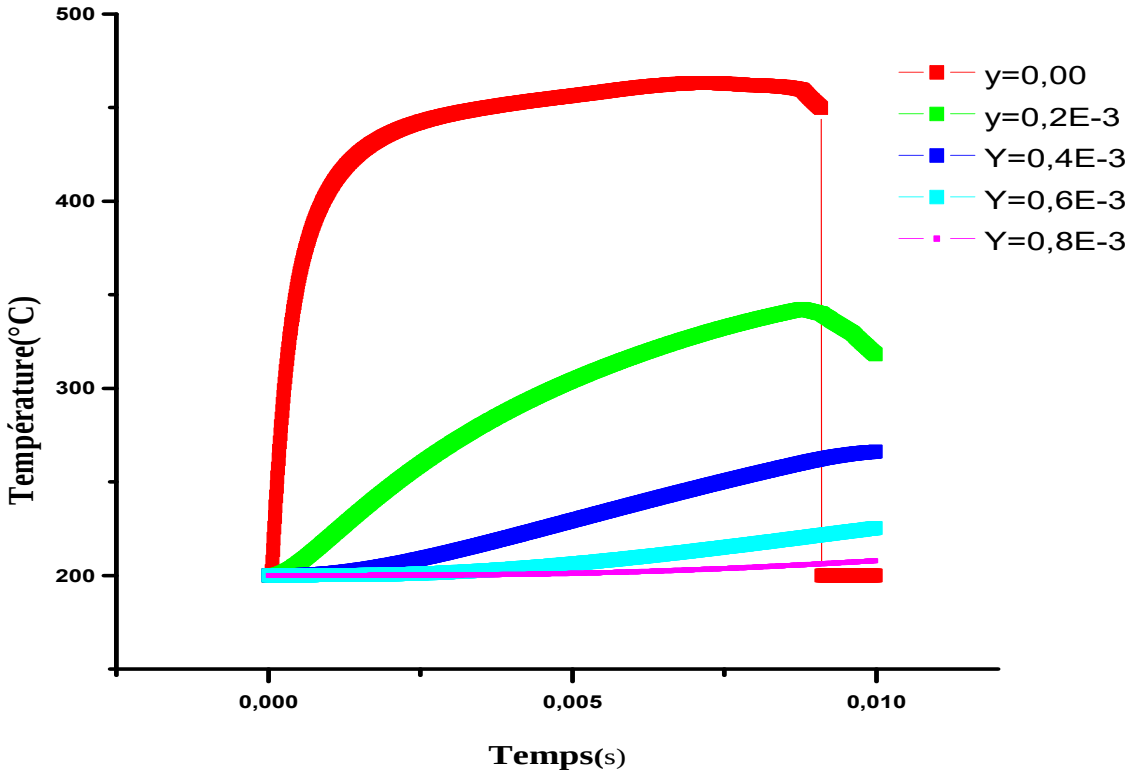


Figure IV.39: Profiles de température en fonction de temps Pour α = 9.1°.

Le graphique précédent montre la variation de la température pour la gouttelette projetée en oblique avec un angle alpha=9,1° et qui s'est éclaboussée et déchiquetée sur le substrat c'est ce qui explique qu'au premier point d'impact la température a grimpé rapidement puis d'un seul coup elle est redescendu aux environs de 200° qui est la température initiale du substrat du fait que la dissipation thermique sur la surface se fait rapidement, alors que les courbes des autres nœuds contrôlés redescendent doucement à cause de la chaleur qu'a emmagasiné le substrat.

➢ **Comparaison entre les profiles de température pour les trois angles:**

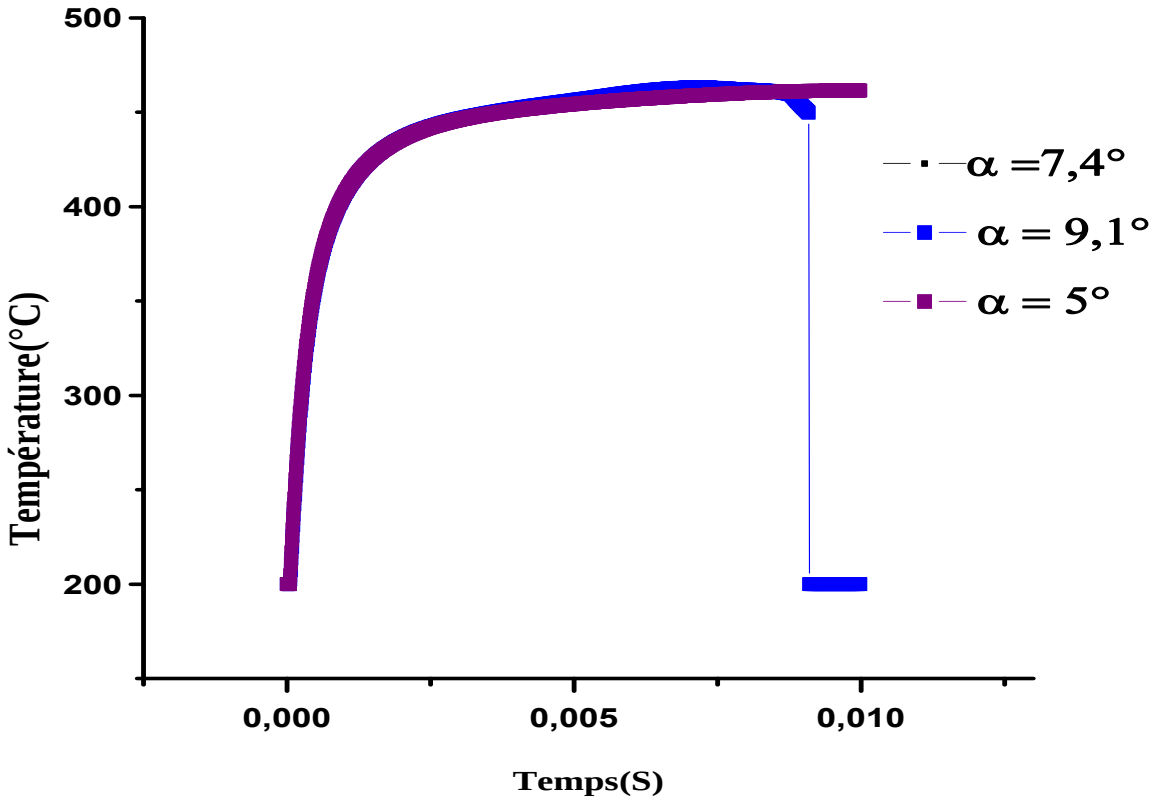


Figure IV.40: Comparaison entre les profiles de température pour les trois angles.

Pour la température au point d'impact évolue de la même façon pour α= 7.4° et α= 5° sauf pour α= 9,1° où l'on remarque une légère hausse entre t= 0.005 et 0.0075s et une légère baisse par rapport à α= 7.4 et α= 5, a t= 0.008 puis une chute subite à t= 0.01s à cause de la variation de la vitesse.

➢ **Comparaison entre les variations de pression pour les trois angles:**

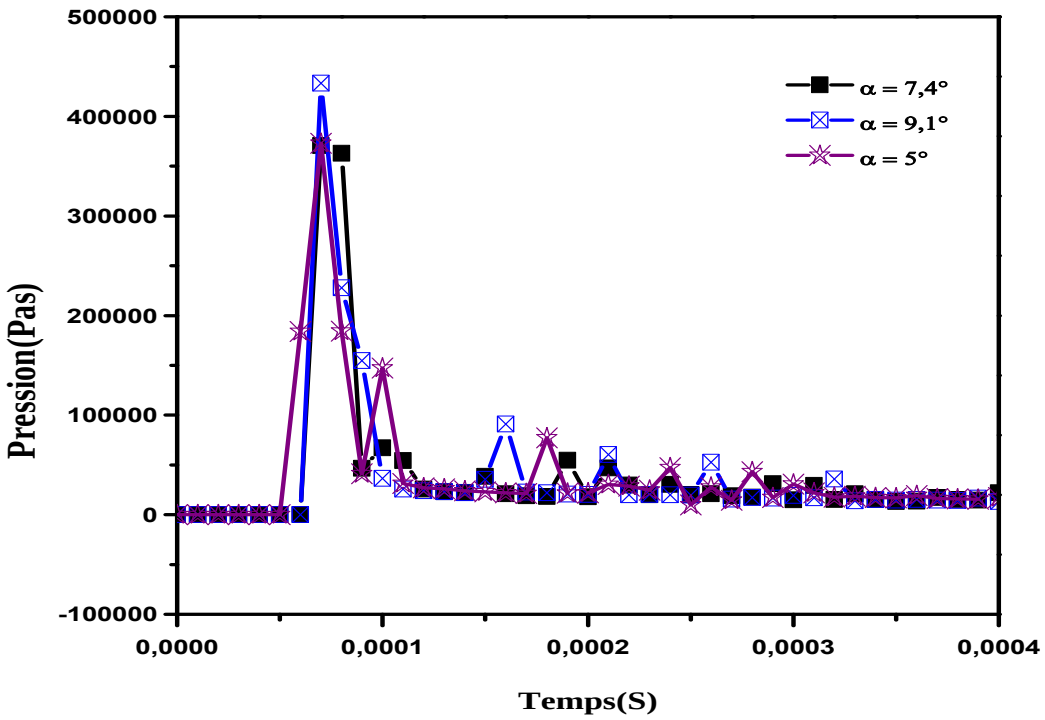


Figure IV.41: Comparaison entre la variation de pression pour les 3 angles.

La figure IV.41 Illustre la distribution de la pression pour les trois cas au point d'impact au cours d'étalement de la goutte, initialement la pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une faible résistance de contact, d'où une bonne interaction goutte /substrat. La pression se désintégré vers zéro très rapidement. Il faut notre ici que, l'augmentation de pression à l'impact pour α=9.1° il arrive jusqu'à 420000 Pas est plus grande que celle α=7.4° et α=5° atteint 380000Pas, ce qui favorise de lamelle sur le substrat dans ce cas. cette différence de pression est influencée par la variation de vitesse selon les axes X et Y.

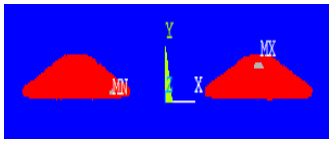
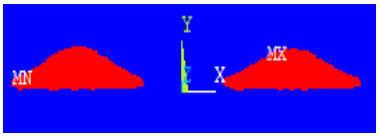
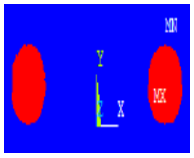
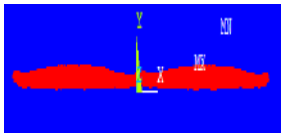
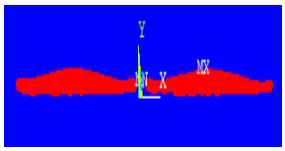
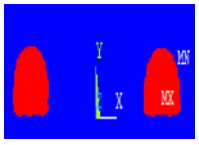
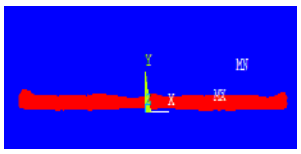
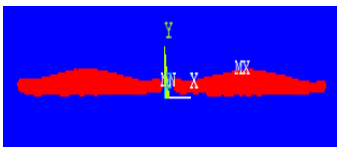
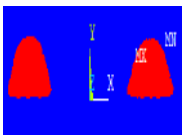
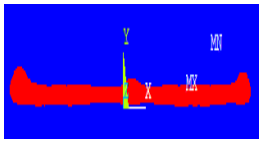
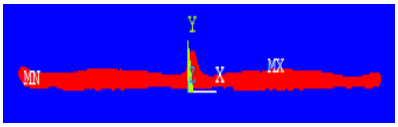
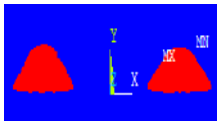
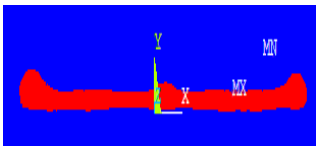
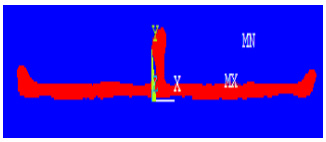
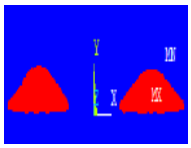
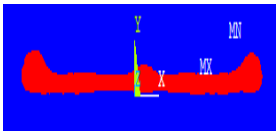
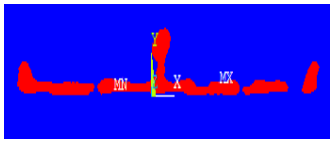
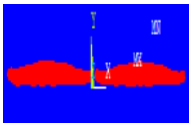
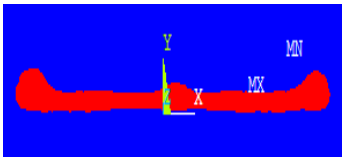
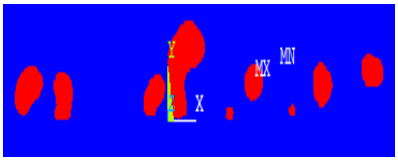
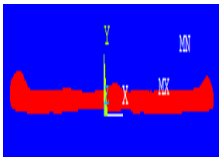
α / temps	5°	9°	7.4°
0.1ms			
0.3ms			
0.5ms			
0.7ms			
1ms			
3ms			
7ms			

Figure IV.42: Comparaison entre les trois angles.

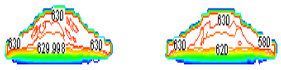
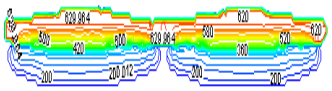
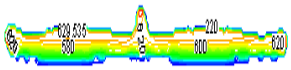
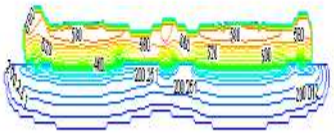
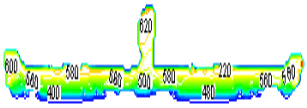
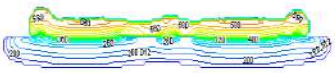
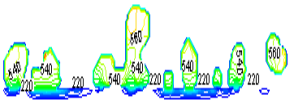
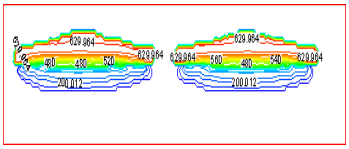
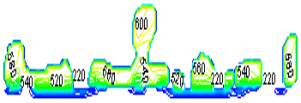
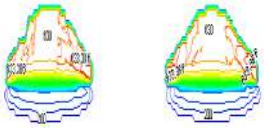
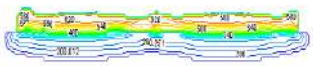
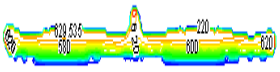
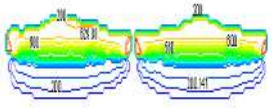
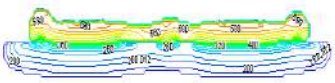
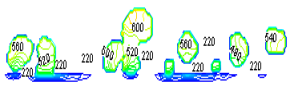
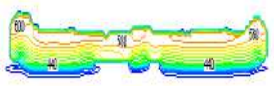
α / temps	5°	9°	7.4°
0.1ms			
0.3ms			
0.5ms			
0.7ms			
1ms			
3ms			
7ms			

Figure IV.43: Comparaison pour les trois angles de projection oblique.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré principalement au traitement des résultats lors de la simulation d'impact d'une Particule d'aluminium sur un substrat en acier, finalement nous avons pu comprendre quels sont les différents facteurs intervenant lors de l'impact et l'étalement de la particule sur le substrat tels que : Le facteur d'étalement, la pression d'impact et la propagation de la température dans le substrat.

Les résultats obtenus montrent que :

- La pression au point d'impact augmente rapidement dés le contact de la goutte avec le substrat puis elle tend vers zéro au cours de l'étalement.
- L'angle de contact petit, la dissipation d'énergie est importante qui conduit à un bon étalement
- L'Étalement est lié au transfert de l'énergie cinétique en énergie d'écoulement visqueux et en énergie de tension de surface
- la formation d'une lamelle et la morphologie de l'impact dépend à la fois des paramètres liés à la particule (sa taille, sa vitesse, sa température et ses propriétés thermo-physiques) , du le matériau du substrat et de sa température.
- L'étalement des gouttelettes sur une surface d'acier a été étudié en utilisant des expériences et des simulations numériques. Les résultats de simulation étaient bien conformes aux images expérimentales.
- les paramètres qui ont provoqué l'éclaboussement de la particule sont:

La faible viscosité, une forte vitesse, la température du substrat, l'angles d'impact.

- les doigts à la périphérie de la lamelle formée se sont solidifiés en retard. Ceci est dû au flux radial et à la séparation à grande vitesse des principaux bords de la lamelle qui s'est réparti au dessus des aspérités du substrat.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce mémoire était de tenter une approche physique sur les phénomènes de revêtements et spécialement le revêtement d'un substrat par une particule d'aluminium.

Le travail effectué est la pose de trois hypothèses de revêtement que nous avons simulé sur le logiciel multi physique « ANSYS v.11 » , la première était le cas d'une projection de particule d'aluminium pleine sur un substrat en acier , cette simulation nous a permis d'avoir un point de repère pour les deux autres simulations qui ont suivies car la deuxième hypothèse est que nous avons pris une particule d'aluminium creuse au sein de laquelle il y a une bulle d'air afin de voir quel est l'effet qu'a cette dernière sur le revêtement de manière globale , cette approche fut réalisée pour différentes proportions de la bulle d'air au sein de la particule d'aluminium et pour la troisième hypothèse traitée , nous avons essayé de voir quel est l'effet d'une projection plasma en oblique sur le substrat et qui a été réalisé suivant plusieurs angles d'attaque.

Les résultats obtenus sont assez concluants car pour la première hypothèse étudiée les résultats furent validés avec ceux de JAVAD MOSTAGHIMI qui possède les résultats de référence pour ce premier cas étudié, concernant la deuxième hypothèse traitée la présence d'air à montré son influence sur la pression et la température au point d'impact mais aussi sur toute la surface d'étalement de la particule. Cependant, pour le cas d'une projection oblique de la particule sur le substrat, les résultats obtenus montrent clairement que le jet en oblique a provoqué l'éclaboussement de la particule ce qui a provoqué la non réussite du revêtement.

REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES

[1] M.U .Schoop, A new process for the production of metallic coating, Metallurgical and Chemical Engineering, 8 (7), 1910, PP 404-406

[2] A Proner, Revêtement par projection thermique, Techniques de l'ingénieur, Traité matériaux métallique, M 1 645, pp 1-20

[3] M. K. Fataoui "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique. Modèle mécano thermique de l'étalement de la gouttelette". Thèse de doctorat, Université de Limoge

[4] Y. MEBDOUA (2008)" Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du Dépôt " Thèse de doctorat, Université de Limoges.

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

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

[7] Dussoubs B. (1998)"Modélisation tridimensionnelle du procédé de projection plasma :influence des conditions de la poudre et des paramètres de projection sur le traitement et la répartition des particules dans l'écoulement", Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[8] GIRARD Laurence Caractérisation Expérimentale d'une Torche De Découpe dans L'oxygène : étude de jet de plasma et de l'interaction arc-matériau ; Université Paul Sabatier, Toulouse III pp 5-6.

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

[10] R. Etchart-Salas Projection par plasma d'arc de particules submicroniques en suspension. Approche expérimentale et analytique des phénomènes impliqués dans la reproductibilité et la qualité des dépôts. These de Doctorat d'Université, Limoges, université de Limoges, 2007, 230 p.

[11] Pfender Electric arcs and arc gas heaters In Gaseous electronics, (Ed.) M. N. Hirsch & H. J. Oskam, Academic New York, 1, 1978, p.291.

[12] E. Pfender Generation and properties of non equilibrium plasmas. In International Summer School on Plasma Chemistry, (Ed.) E. Pfender, University of Minesota, USA,1987, p. 65.

[13] M.P. PLANCHE, **J.F. COUDERT**, and **P. FAUCHAIS**. Velocity measurements for arc jets produces by a dc plasma spray torch. Plasma Chem. Plasma Process, 18 :263–286, 1998.

[14] FAUCHAIS and **A. VARDELLE**. Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying. Int. J. Therm. Sci., 39 :852–870, 2000.

[15] E. Pfender, plasma jet behavior and modeling associated with the plasma spray procss, Thin Solid Films, 238 (2), 1994, pp228-241.

[16] E. Pfender, **J.R. Fincke, R. Spores,** Entrainment of could gas into thermal plasma jets, Plasma Chem. & Plasma Process, 1 (4), 1991, pp 529-543.

[17] O. Lagnoux, **A Denoirjean**, **L**. **Bianchi**, **M.F**. **Elchinger**, **P**. **Fauchais**, Enthalpy probe measurement : Interaction between plasma jets and entrained atmosphere , in Progress in Plasma Processing of Materials,(ed.)P. Fauchais, (pub.) Begell House, USA, 1999, pp339-346

[18] B. Pateryron, **G**. **Delluc**, **M.F. Elchinger**, **P. Fauchais,** Study of behavior of the heat conductivity and transport properties of a single reacting system: H2-air and H2-air. Dilution effect in spraying process at atmospheric pressure, J High Temp. Chem.Processes,1 (3), 1992, pp 325-332.

[19] R. SPORES and E**. PFENDER**. Flow structure of a turbulent thermal plasma jet. Surf. Coat. Tech., 37 :251–270, 1989.

[20] V. Debout Contribution à l'étude des propriétés optiques de dépôts plasma de zircone yttriée: Influence de leurs caractéristiques microstructurales et physico-chimiques. Thèse de Doctorat d'Université, Limoges, Université de Limoges, 2007, 306 p.

[21] S. Janisson Etude des jets de plasma et du traitement des particules en projection plasma avec mélanges ternaires de gaz en atmosphère et température contrôlées. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 1999.

[22] M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender Thermal Plasma: Fundamental and Applications. Plenum Press, New York, 1, 1994, 452 p.
[23] P. Fauchais, A. Vardelle Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying. International Journal of Thermal Science, 39, 2000, pp. 852-870.
[24] Z. Duan, L. Beall, J. Schein, J. Heberlein, M. Stachowicz Diagnostics and Modelling of an Argon/Helium Plasma Spray Process. Journal of Thermal Spray Technology, 9, (2), 1999, pp.225-234.
[25] M. P. Planche, J. F. Coudert, P. Fauchais Velocity Measurements for Arc Jets Produced by a DC Plasma Spray Torch. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 18,1998, pp.263-283.
[26] D. Sacriste, N. Goubot, An Evaluation of the Electric Arc Spray and (HPPS) Processes for the Manufacturing of High Power Plasma Spraying MCrAlY Coatings, Thermal Spray Technology, Vol.10 (No.2), 2001, pp352-358
[27] T. Vais, E. Rajamaki, Effect of the Nozzle Design and Atomization Gas on the Properties of the Electric Arc Sprayed Ni18Cr6Al2Mn-Coating: Tagungsband Conference Proceeding, (Ed.) E. Lugscheider, P.A. Kammer, (Pub.) DVS Deutsher Verband fur Schweiben, Germany, (1999), pp550-552
[28] TAHAR Souâd, « Influence de la température de jet sur l'empilement des couches pendant la construction d'un dépôt par projection thermique », Université de Médéa
[29] Mohamed Bouneder, « Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les poudres composites métal/céramique en projection thermique : Application à la projection par plasma d'arc soufflé argon hydrogène », Thèse de Doctorat d'Université, Limoges
[30] Y.M. Yang, C. Coddet and M. Imbert, Numerical modeling and simulation of particule behaviours in an HVOF supersonic flow. Proc. of the 15th Int. Thermal Spray Conf. 25-29 May 1998, Nice, France.
[31] S. Sampath, X. Y. Jiang, J. Matejicek, A. C. Leger, A. Vardelle Substrate Temperature Effects on Splat Formation, Microstructure Development and Properties of Plasma Sprayed Coatings. Part I: Case Study for Partially Stabilized Zirconia. Materials Science and Engineering A, 272, 1999, pp.181-188.
[32] C. Mundo, M. Sommerfeld, C. Tropea Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process. International Journal of Multiphase Flow, 21 (2), 1995, pp.151-173.
[33] E. Nogues-Delbos Densification de dépôts de zircone yttriée projetés par plasma d'arc Ar-H2 et N2-H2 pour leur utilisation dans l'industrie des semi-conducteurs. Thèse de Doctorat d'Université, Université de Limoges, 2007, 218 p.
[34] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron, P. Fauchais Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation. Proceedings of th 2004 International Thermal Spray Conference, Osaka, Japon, 10-12 mai 2004, (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD-ROM, 6p.
[35] A. Vardelle, C. Moreau, P. Fauchais, Deposit formation dynamics, MRS Bulletin, 2000, July, pp 32-37.
[36] 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
[37] 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.
[38] 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.
[39] S. Sampath, X.Y. Jiang, J. Matejicek, A.C. Leger, A. Vardelle, Substrate temperature effects on splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings Part I: Case study for partially stabilized zirconia, Material Science and Engineering A, 272, 1999, pp 181-188.

[40] C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, Influence of Substrate preparation on the flattening and cooling of plasma-sprayed particles, J. Thermal Spray Technology, 4 (1), 1995, pp 25-33.

[41] 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.
[42] 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.
[43] J. Madjeski Solidification of Droplets on a Cold Surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp.1009-1013.
[44] S. Chandra, P. Fauchai Formation of solid splats during thermal spray deposition. Journal of Thermal Spray Technology, 18 (2), 2009, pp. 148-180.
[45] M. Vardelle, A. Vardelle, A. C. Léger, P. Fauchais, D. Gobin Influence of Particle Parameters at Impact on Splat Formation and Solidification in Plasma Spraying Processes. Journal of Thermal Spray Technology, 4 (1), 1995, pp.50-58.
[46] D. Bernard, P. Fauchais Influence of the Torch-Substrate Relative Movements and Cooling of the Coatings during Spraying on the Mechanical Properties of TBCs. Thermal Spray Research and Applications, (Ed.) F. Bernecki, (Pub.) ASM International, pp.551-560.
[47] C. J. Li, Y. He, A. Ohmori Characterization of Structure of Thermally Sprayed Coating. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Nice, France, 25-29 Mai 1998, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM international, Ohio, USA, pp.717-722.
[48] A. J. Allen, J. Ilavsky, G. G. Long, J. S. Wallace, C. C. Berndt, H. Herman Microstructural Characterization of Yttria Stabilized Zirconia Plasma-Sprayed Deposits using Multiple Small-Angle Neutron Scattering. Acta Materialia, 49, 2001, pp.1661-1675.
[49] G. Antou, G. Montavon, F. Hlawska, A. Cornet, C. Coddet Exploring Thermal Spray Grey Alumina Coating Pore Network Architecture by Combining Stereological Protocols and Impedance Electrochemical Spectroscopy. Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, Seattle, USA, (Ed.) B.R. Marple, M.M. Hyland et al., (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD Rom, 7 p.
[50] 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.
[51] J. H. Clare, D.E. Crawmer, Thermal Spray Coatings in Metallic Coating Processes, in Metal Handbook, 9th Ed.,Vol. 5, Surface Cleaning Finishing and Coating, (pub.) ASM, International, OH USA, 1982, pp361
[52] X. Wang, D. Zhuang, Effect of Atomising Gas Pressure on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp587-592.
[53] 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.
[54] N. A. Hussary, J. Heberlein, Investigation of arc Behavior and Particle Formation in the Wire Arc Spray Process Using High Speed Photography: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp737-742.
[55] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, J.C. Labbe, P. Fauchais, Influence of Substrate surface Oxidation Stage on the Morphology and Flattening of Splats, Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Plasma Processes, July 2002, Strasbourg, France, Begel house.
[56] X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Shrouded CO2 Atomization on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park,Ohio,USA,(1995),pp31-37.
[57] G. Espié, P. Fauchais, Study of the in-Flight Oxidation of Iron Particles during the APSEffect of Dissolved Oxygen on the Wetting onto Ceramic Substrates, Advanced Materials and Processes, Ed. 99, 1999, pp423-429

[58] Gilles Espié, Oxydation de particules de fer dans un plasma d'arc Ar-H2, influence sur les propriétés du dépôt, Thèse de doctorat, Procèdes Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, 2000, pp8-11 et pp80-84
[59] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, B. Hannoyer, J.C. Labbe, P. Fauchais, Oxidation at Different Stages in Stainless Steel Coatings Developed by Air Plasma Spraying on Plain Carbon Steel, Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Spray, July 2002, Strasbourg, France, Begel House.
[60] H. Zhang, G. Espié, Oxidation and Evaporation of Iron Droplet in a Plasma Jet, ISPC 14, Prague, Ed. Hr bovsky, Vol. 5, August 1999, pp2775-2784
[61] M.F.Smith, R.C. Dykhuizen, Oxidation in HVOF-Sprayed Steel, Thermal Spray: a United Forum for Scientific and Technological Advances, (Ed.) C.C Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1997), pp885-893.
[62] A. Vardelle, P. Fauchais, N.J. Themelis, Oxidation of Metal Droplets in Plasma Sprays: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C. Coddet and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp175-180.
[63] A. Harir, Contribution a la faisabilité de dépôts composites métal-lubrifiant solide élabores par plasma d'arc, Thèse de l'Université de Limoges, 2002
[64] 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 21st Century, (Ed.) C. Coddet,(Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp263-268
[65] L. Bianchi, Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques : mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts, Thèse de l'Université de limoges, 1995
[66] 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
[67] G. Jandin, H. Liao, Z.Q. Feng, C. Coddet, Correlations Between Operating Condition, Microstructure and Mechanical Properties of Twin Wire Arc Sprayed Steel Coating, Materials Science Engineering, A00 , 2002, pp1-8
[68] A.M. Ahmed, R.H. Rangel, V.V. Sobolev, J.M. Guilemany, In-Flight Oxidation of Composite Powder Particles During, Thermal Spraying, Heat and Mass Transfer, 44, 2001, pp4667-4677
[69] 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
[70] 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
[71] J. Comy, Treatment and Analysis of Adhesive Bonding, Thermal Spray Technology, Vol. 10 (No.3), 1990, pp161-165
[72] 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
[73] P Charles Howes, Processing, Preparation, Coating and Applications, Welding, 73, 1991, pp47-51
[74] 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
[75] 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
[76] 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
[77] 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-

[78] 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
[79] 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
[80] 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
[81] 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
[82] T. Suzuki, K. Ishikawa, Y. Kitamura, Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp1033-1038
[83] S. Simard, B. Arsenault, Influence of Thermal Spray Process on the Corrosion Behavior of High-Density 316 Stainless Steel Coatings in Simulated Marine Environment: Advancing the Science and Applying the Technology, (Ed.) B.R. Marple, C. Moreau, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2003), pp323-327
[84] C. Ding, J. Li, L. Zhang, X. Yu, Wear Evaluation of Plasma Sprayed Oxide and Carbide Coatings: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp275-278
[85] Site Internet de Gordon England: www.gordonengland.co.uk
[86] 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.
[87] F. Ben ettouil(2008)" Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc" thèse de doctorat à Université de Limoges.
[88] H. Makhlouf (2008) "Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers" thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
[89] F. Ben Ettouil, **B. Pateyron**, **H. Ageorges**, **M. El Ganaoui**, **P. Fauchais**, **O. Mazhorova** Fast modeling of phase change in a particle injected within a d.c. plasma jet J. Thermal Spray Technology, 16, 2007, 744-750.
[90] 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.
[91] V.R.Voller.(1990)Fast implicit finite difference method for the analysis of phase change problems.IMA Journal of Numerical Analysis ,30:875-898.
[92] M.Rappaz,M.Bellet ,and **M.Deville**.(2003) Numerical Modeling in Materials science and Engineering. Springer series in Computational Mathematics,Springer-verlag edition.
[93] 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.
[94] 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.
[95] B .J. Daly. A technique for incuding surface tension eects in hydro_dynamic calculations. J. Comput. Phys, vol. 4, p. 97-117, 1969
[96] F. H. Harlow and **J. E. Welsh.**" Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow with free surface". Phys. Fluids, 8 :2182-2189, 1965.
[97] F. H. Harlow and **J. P. Shannon**. " The splash of a liquid drop". J. Appl. Phys, 38 (10) :3855 3866, 1967.
[98] S. Vincent. Modélisation d'écoulements incompressibles de fluides non-miscibles. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1999.
[99] http://thetis.enscbp.fr/sites/default/files/theses/these_j_breil.pdf.; 2012
[100] V.V .Sobolev, Formation of splat morphology during thermal spraying. Materials Letters, vol. 36, p, 123-127, 1998.

REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES

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

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

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

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

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

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

[107] Mr: mohri : polycopie Aluminium et ses Alliages**,** Chapitre I Matériaux Métalliques, 3èmeAnnée, LMD Mécanique (CAO+SDM).. university Médéa page 4,5,6.

[108] http://www.techniques-ingenieur.fr

[109] Mellallm. Influence de la rugosité et de la température du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma. Thèse de doctorat d'université. Université de Limoges, 1994, 292 P

[110] F. H. Harlow and **J. P. Shannon**. " The splash of a liquid drop". J. Appl. Phys, 38 (10) :3855 3866,1967

ANNEX

ANNEX

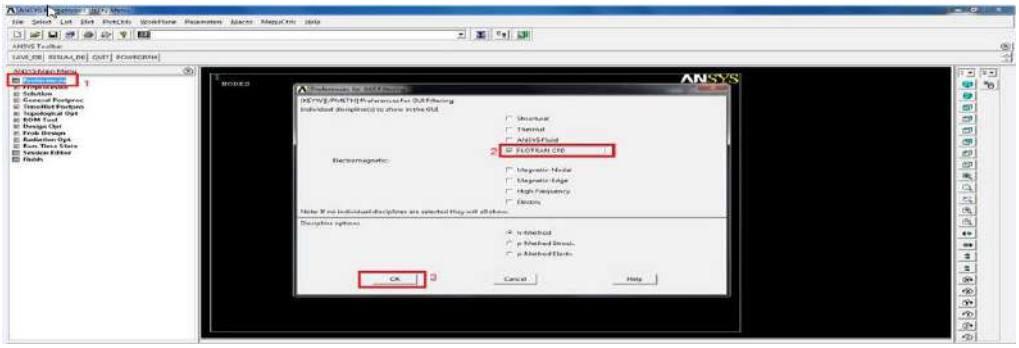
Les étapes à suivre pour simuler mathématiquement un problème Impact d'une particule de 3.92mm de diamètre sur un substrat en acier les géométries dont on avait besoins sont seulement des grands rectangles qui représentent le substrat et l'environnement ainsi que un cercle qui représente la particule.

Méthode de travail:

- ✓ ouvrir l'ANSYS

Le menu de démarrage ⟶ click sur l'icône d'ANSYS.

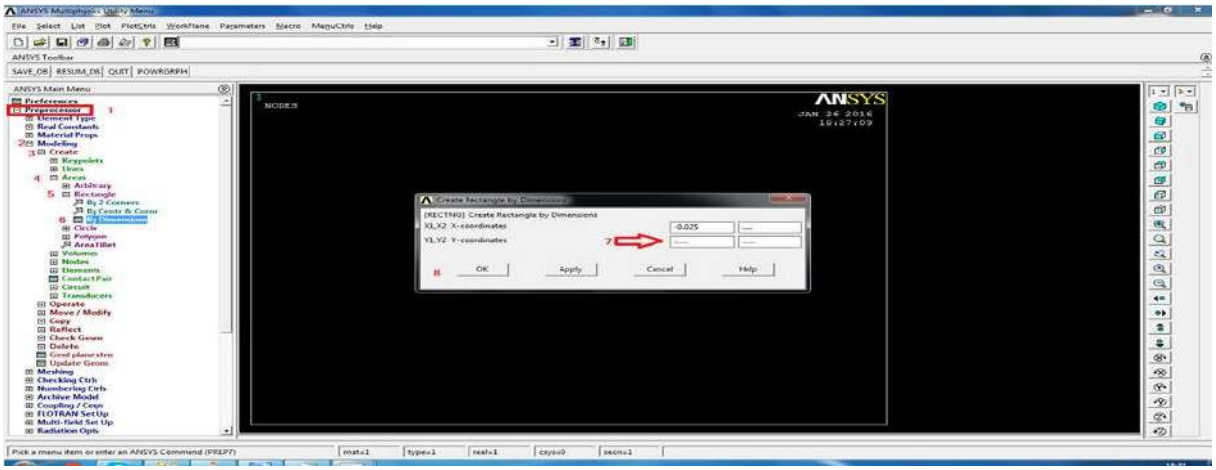
✓ Preferences → fluide CFD → ok



- ✓ Création de géométrie

Preprocessor →modeling →create →areas →rectangle →by dimension

- Pour les deux rectangles (substrat / environnement)



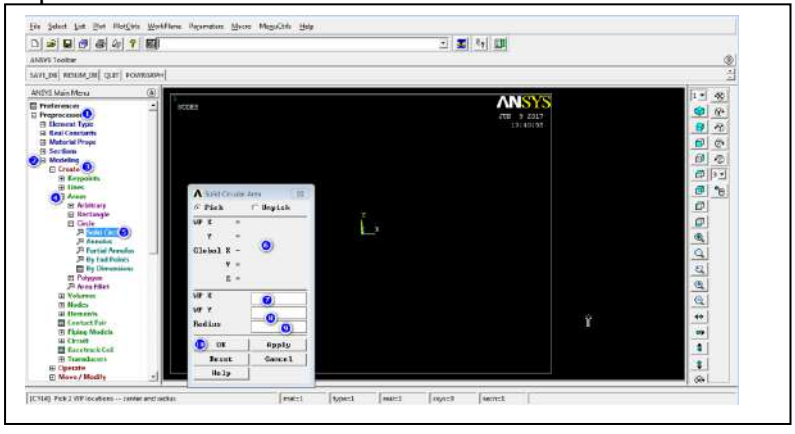
- Pour la cercle qui présente la particule

preprocessor

modeling →create

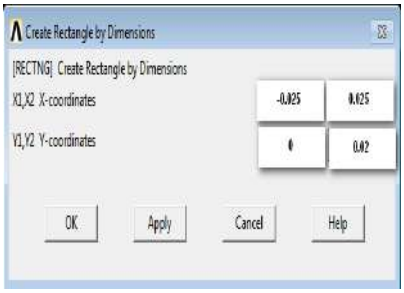
areas → circle →

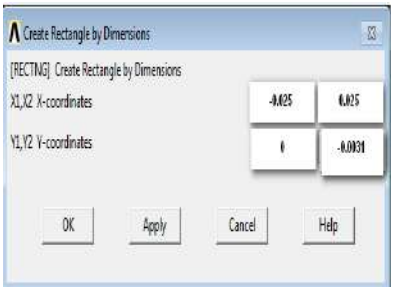
solide circle

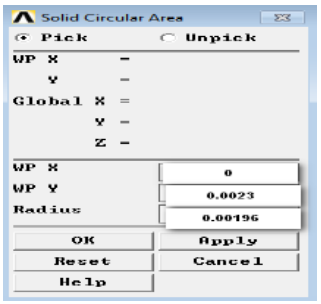


ANNEX

Rectangle environnent rectangle substrat cercle de la particule







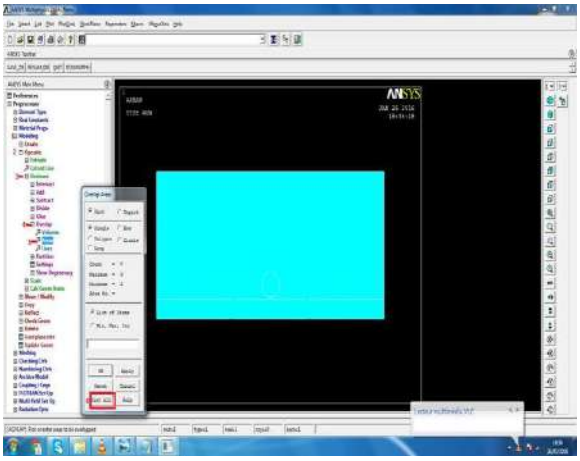
On aura :



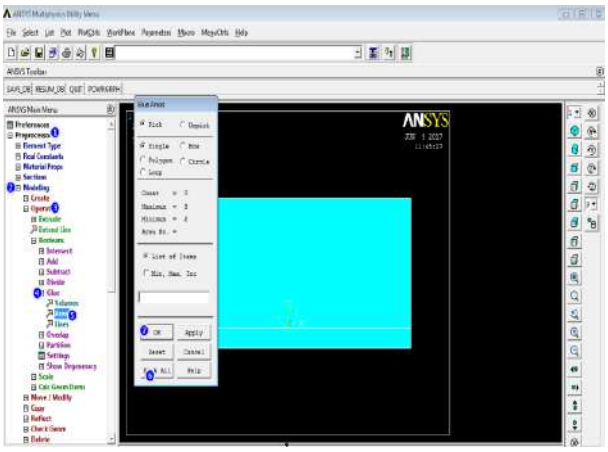
✓ Homogénités des géometries :

Modeling →opérate→ booling→ overlap→ areas→pickall

Modeling →opérate →booling →glue →areas→ pickall



Overlap

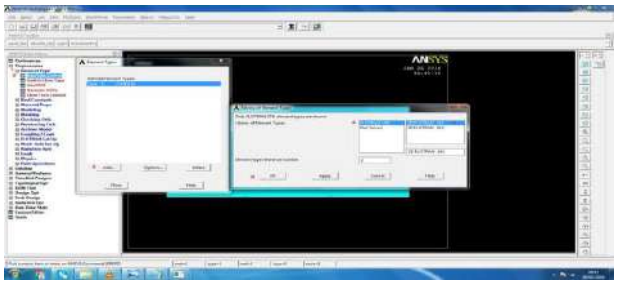


Glue

✓ Choix de matériau:

- Le domaine de matériau

Preprocessor→ element type→add/edit/delete→ flotranCFD→2Dflotran141



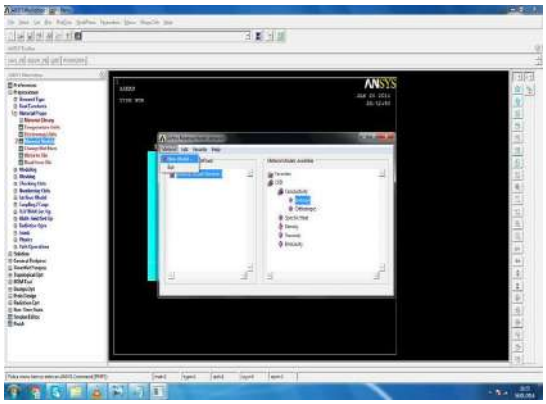
- Le matériau et leur propriété

Preprocessor → material props → material model → Material number 1 → CFD → remplissage des proprieties d'aluminum dans le tableau (density, specific hate, viscosity)

Preprocessor → material props → material model → material → new material → CFD → remplissage des proprieties de l'acier dans le tableau (density, specific hate, viscosity).



Aluminum



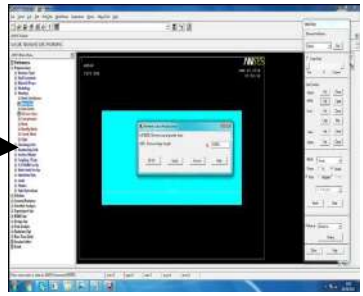
acier

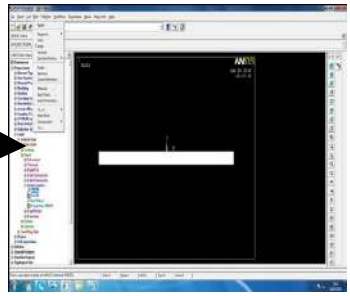
✓ Le maillage:

- Le substrat

Preprocessor→meshing→ mesh tool→devant global <set>→ ok→areas click sur <set> → click sur la surface de substrat→ ok→ 0.0002→ok→ mesh click la surface de substrat

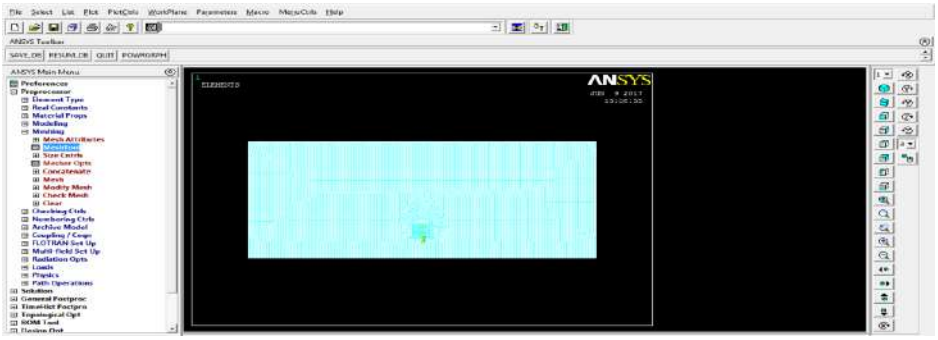






- La particule

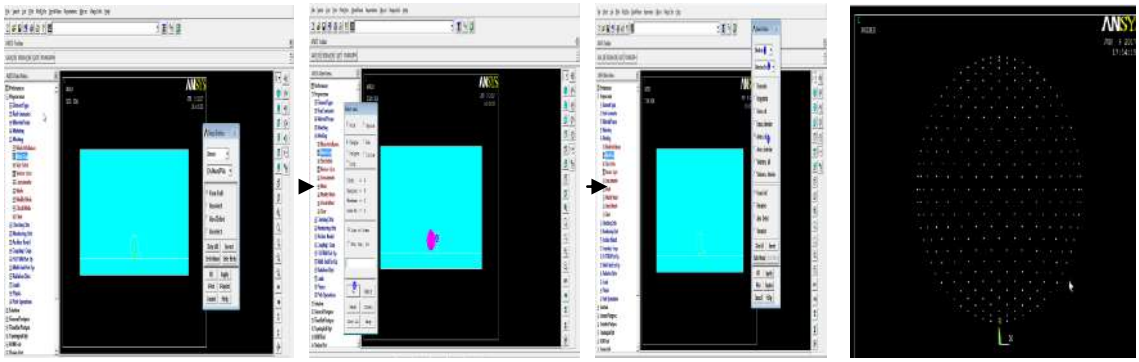
Preprocessor→meshing→mesh tool→devant global <set>→ material number 2→ ok→Devant areas click sur <set>→click sur la surface de l'environement et le cercle du particule → ok 0.0002→ ok→ mesh→ click la surface de l'environement et le cercle à la fois.



✓ Condition aux limites (CL) et condition initial (CI):

- Préparation de la zone pour mettre les conditions

Select → entities → areas → by name pick → ok → click dans la cercle → ok → select → entities nodes → attached to → areas all → ok → Plot → nodes.



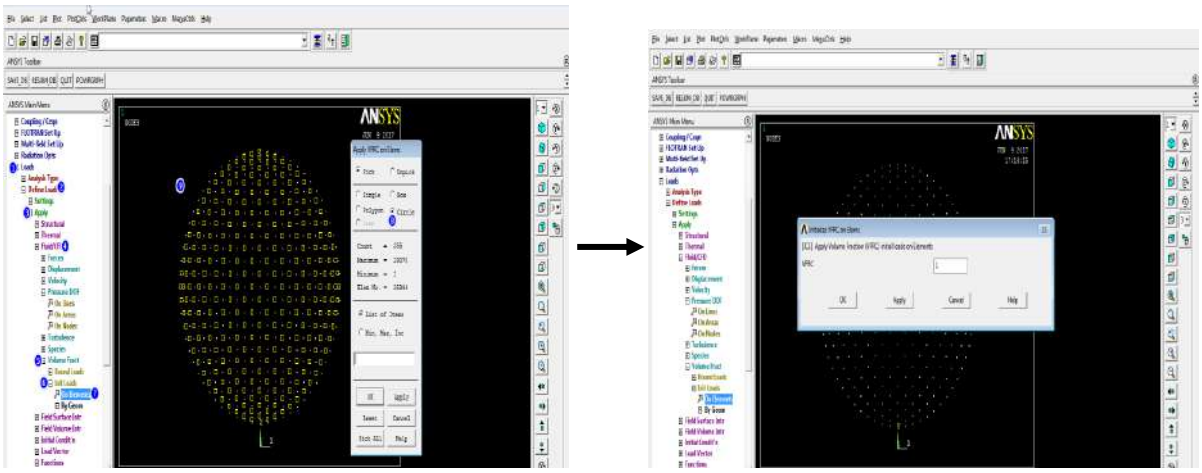
On peut donc mettre les conditions initial (vitesse/ température)

- VOF : C=1

Loads → défine loads → apply → fluid CFD → volume fraction → init loads → on elements →

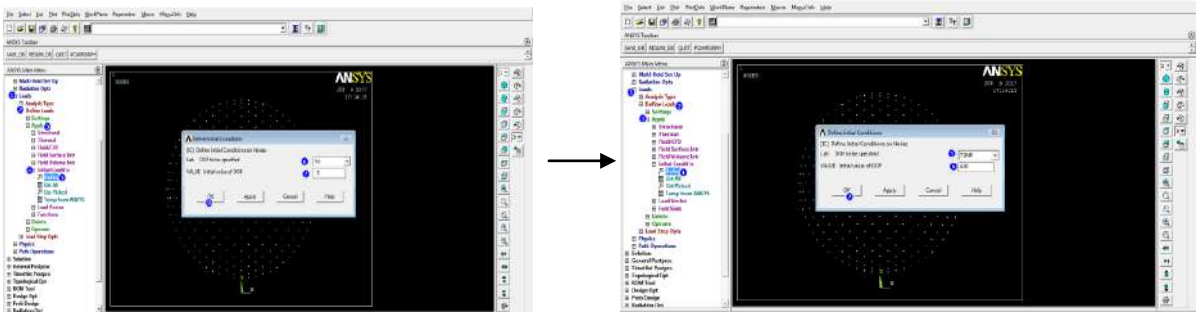
Sélection la cercle par la souris depuis le centre de cercle jusqu'au frontières du cercle → ok verc 1.

→



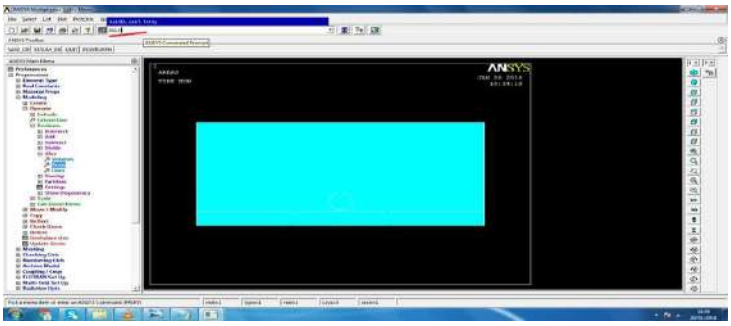
- Vitesse / température

Preprocesseur→ load→define→load→apply→ initial condit'n→ define→ active circle selection la cercle →Vy→-3→define→active circle selection la cercle →temps →630°.



Pour revenue au schéma global

Dans la barre d'outil on écrit <alls> → entrer



- Le substrat (température)

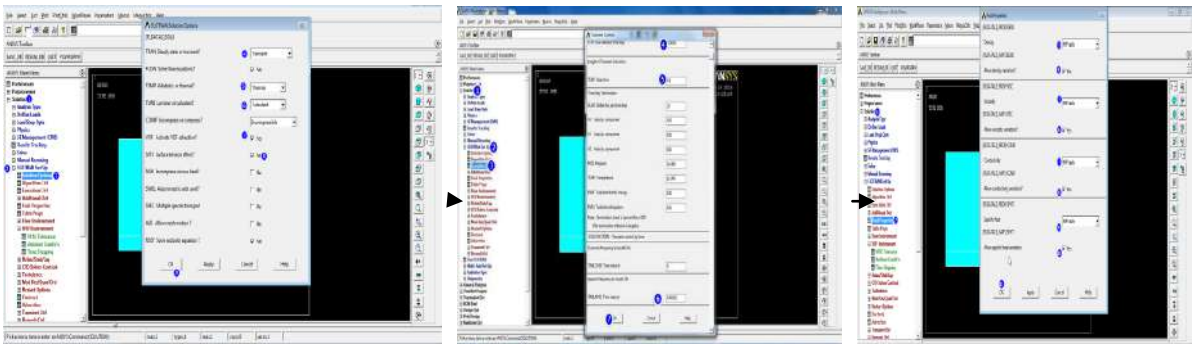
Select→entities→nodes→attached to→click sur surface substrat→areas alls→ load→ define loads→initial condit'n →define→ box→ selection la surface →temp→200°→Alls→enter

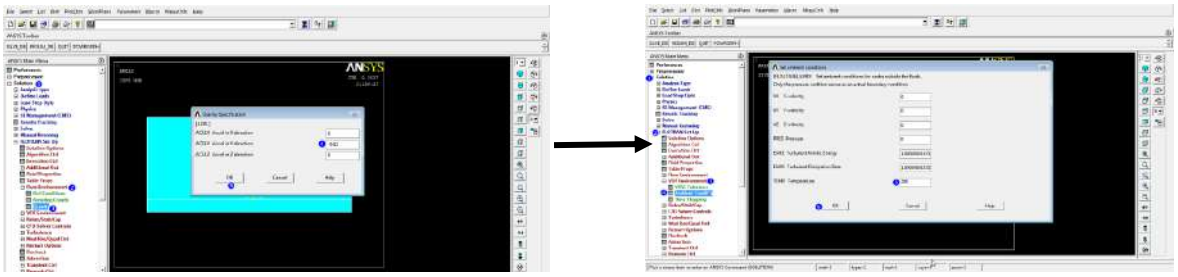


- ✓ Execution du problem:

Solution→ flotran set up→ solution option→ transient→ thermal→ ok→ **execution ctrl**→global iteration → 0.00001→ APPE.rfl file→ 0.001→ Time APPE→ 0.00001→ **fluid proprieties** → cocher MP TABLE et YES pour; (density – viscosity – conductivity – specific heat) ok → →

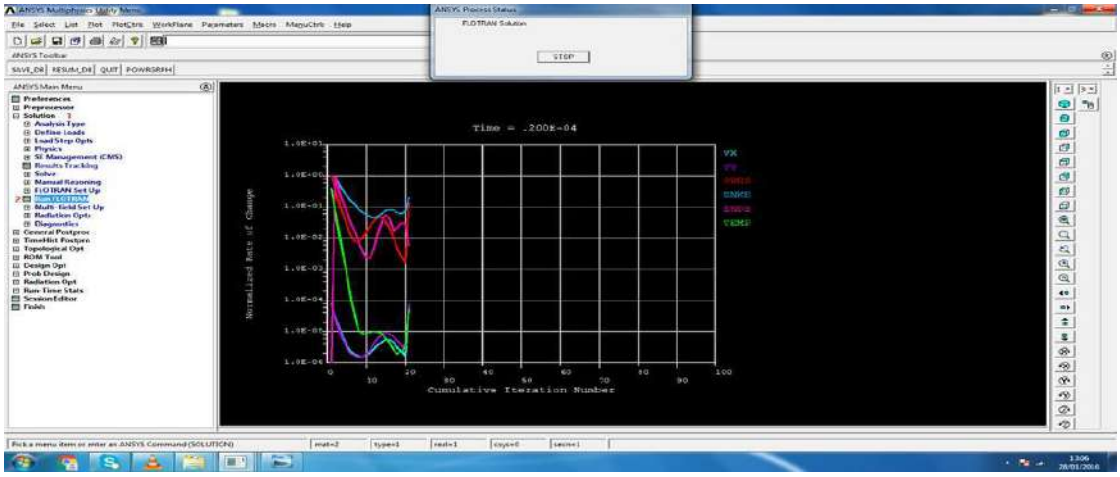
Flow environment→ gravity → y= -9.81→**VOF environment** →ambient condit'n→ 200





✓ Exécution de calcul

Solution → run flotran



General prostproc → plot résult→ contour plot→nodal solution→ contour plot→ volume fraction

