République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia FARES de Médéa

Faculté des Science et de la Technologie

Département du Génie de la Matière

Mémoire de Projet de fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie mécanique

Option : conception de mécanique

Thème :

Simulation numérique de l'impacte de gouttelette de métal creuses sur une surface plane et influence de la température de l'enveronnement sur la formation de lamelle

Présenté par

yahiaoui Intissar

Kouaderi soumia

Proposé et dirigé par :

Dr. ZIRARI Mounir

co-promoteur

Dr . gumana MOLOUD

Promotion: 2013-2014

Merci Allah

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 travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : (**ZIRRARI MOUNIR**), son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant de 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 et à toutes.

Je dédie ce modeste travail

A ceux qui sont le symbole de tendresse, qui se sont

Sacrifiés pour mon bonheur et ma réussite, qui

ont été mon nombre durant toutes les

années des études,

à mes très chers parents qui ont toujours

été là pour moi, j'espère qu'ils trouveront dans ce

travail toute ma reconnaissance et tout mon amour

Et que dieu les garde et protège.

A mes chers frères et sœurs: Romaissa, Ayoub et Houssam.

A chaque cousins et cousines

A mes meilleurs amis: Djahida, Laila, Souraia, Amina

A tous mes collégues de la promotion 2013/2014.

A tous ceux qui me sont chéres

A tous ceux qui m'aiment.

Imtissar

A celle qui est le symbole de tendresse

A ma mère

A celui qui est l'école de l'enfance

A mon père

A mes chers frères et sœurs:

Zaineb, Boudjra, Imene, Ounayna, Raouf, Aymen, Amine

A chaque cousins et cousines

A tous mes collègues de la promotion 2013 2014.

A tous ceux qui me sont chères

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime

Je dédie ce mémoire.

Soumia

موجز

على الرغم من العديد من الأعمال النظرية و التجريبية لتفاعل قطرات معدنية على الركيزة خلال عملية الطلاء الرش الحراري ,لا تؤخذ ديناميكيات تأثير قطرات جوفاء و تشكيل لاحقة من الصفيحة بعين الاعتبار في هده الدراسة نقترح جزيئات من الألمنيوم جوفاء و يختلف نسبة الفراغ 25 ,50 و75 و أيضا تأثير درجة الحرارة المتغيرة بنسبة لجزيئات الألمنيوم و الصفيحة .و تشير تقديرات نموذج تأثير تدفق الحيوي و إقراره خلال تأثير نشر و ترسيخ القطرة و في هده الحالة باستخدام طريقة العناصر المحددة في البرنامج بحساب ANSYS نموذج الديكارتي D2 يسمح لدراسة تأثير و نشر و ترسيخ للجسيمات. و هدا تأثير بشكل مباشر من خلال وجود فراغ وتغيير في درجة حرارة الألمنيوم و الصفيحة ,

الكلمات الرئيسية

المحاكاة العددية , العناصر المنتهية , الرش الحراري , الأثر , الصفيحة , التصلب , ANSYS

résumé

Bien que de nombreux travaux théoriques et expérimentaux interaction baisse métal sur le substrat lors de la pulvérisation thermique de processus de revêtement, pas pris la dynamique de l'impact des gouttes creux et former plus tard dans la lamina en compte dans ce sujet l'étude suggèrent que les molécules de creux en aluminium et différents taux de vide 25,50, 75 et en outre l'effet de changement de température par les molécules de l'aluminium et de la plaque. et estime effet Nmodj l'écoulement du vital et passé à travers l'influence du déploiement et de la consolidation de la goutte et, dans cette situation de sujet en utilisant la méthode des éléments finis dans le programme calcule la ANSYS Nmodj cartésien D2 permet d'étudier l'impact et le déploiement et la consolidation des particules. Et Hedda effet directement dans le vide et un changement de la température de la plaque d'aluminium

Mots-clés

La simulation numérique, éléments finis, projection thermique, l'impact, la plaque, la sclérose en plaques, ANSYS

Summary

Although many theoretical works and experimental interaction drops metal on the substrate during the coating process thermal spraying, not taken the dynamics of the impact of drops hollow and forming later in the lamina into account in this topic the study suggest that the molecules of aluminum hollow and different void ratio 25.50, 75 and also the effect of temperature changing by the molecules of aluminum and plate. and estimates Nmodj effect the flow of the vital and passed through the influence of the deployment and consolidation of the drop and in this topic situation using the finite element method in the program calculates the ANSYS Nmodj Cartesian D2 allows to study the impact and deployment and consolidation of the particles. And Hedda effect directly through a vacuum and a change in the temperature of the aluminum plate and,

Keywords

Numerical simulation, finite element, thermal spray, impact, plate, multiple sclerosis, ANSYS

Nomenclature

T	température	°C
E_{ci}	énergie cinétique d'impact	J
C_p	chaleur spécifique	J/kg.K
D	diamètre de goutte	(mm)
F_{TS}	tension superficielle	N/m
h	épaisseur de la lamelle	µm
h	l'enthalpie	Kj/kg
Ø	flux de chaleur	W/m^2
T_f	température de fusion	K°
v	vitesse d'impact	m/s
α	diffusivité thermique	M^2/s
δ	fonction Dirac	-
m	Masse	kg
μ	viscosité dynamique	Pa.s
ρ	masse volumique	kg/m^3
σ	tension superficielle.	J/m²
Ep	énergie potentielle	J
t	Temps	s
R_e	nombre de Reynolds	-
P_e	nombre, de Peclet	-
Oh	nombre d'Ohnesorge	-
K	nombre de Sommerfeld	-
S_c	Terme source ou puits changement de phase	$[W.m^{-3}]$

Sommaire :

Introduction générale

Chapitre1 : La projection plasma

I.1- La projection thermique…….....4

I. 2. Les différents procédés……....4

I. 2. 1. La projection par flamme ……. 5

I .2. 1. 1- La projection flamme-poudre …… .5

I. 2. 1. 2- La projection flamme-fil ……..5

I .2. 1. 3 - Projection supersonique par combustion ……... 6

I. 2. 1. 4- Le canon à détonation……... 6

I.2.2. La projection par arc électrique…….. 7

I. 2. 2.1 - La projection arc-fil ……...7

I.2.2.2- La projection par plasma d'arc soufflé…… 7

I.2.3-La projection plasma ……8

I.2.3.1- Principe …… ……... 8

I.2.3.2- Fonctionnement de la torche à plasma d'arc ……...11

I.2.3.2.1- Amorçage de l'arc …… 12

I.2.3.2.2- Le gaz plasmagène …… 12

I.2.3.2.3 Injection des gaz …… 13

I.2.4 Formation du jet plasma …… 14

I.2.5- Ecoulement du jet plasma…… 19

I.2.6 Développement des torches de projection …… 20

I.2.7-Traitement des particules dans le jet plasma ……..22

I.2.7.1- Injection de la poudre ……22

I.2.7.2 Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement plasma-particules….24

I.2.7.3- Transfert de chaleur ……...25

I.2.7.4-Transfert de quantité de mouvement……26

I.2.7.5 Effet des fluctuations du jet plasma sur le traitement des particules ……29

I.2.8-Impact et formation du dépôt…… 31

I.9- Conclusion……35

Chapitre II : Résolution numérique de l'impact de gouttes sur un substrat solide

II.1-Introduction……..36
II.2- Les équations du problème ……36
II.2.1- Méthodes numériques……...36
II.2.2- Modèle à un fluide……....37
II.2.3- Modélisation de la tension de surface…….….39
II.2.4- Modélisation du substrat……..40
II.3- Méthode numérique de l'équation d'advection……..41
II.4- Equation de l'énergie……..42
II.4.1- Les techniques existantes……...…….....42
II.5- Solidification ……..…….43
II.6- Méthodes numériques de résolution ……..44
II.7- Présentation du code de calcul ANSYS ……....45
II.8- Procédure numérique ……...….46
II.9- Conditions aux limites……...47
II.9.1-Conditions aux limites de l'écoulement……..…...47
II.9.2-Conditions aux limites thermiques……..…47
II.9.3-Découplage pression /vitesse…….……47
II.10- Stratégie de calcul…….…..48
II.11- Conclusion…….48

Chapitre III : résultat et discutions .

III.1-Introduction…….. 49

III.2-Schéma de logiciel ANSYS ……... 49

III.3-Résultats de simulations numériques ……...50

III.4-Matériaux utiliser ……...50

III.4.1.L'aluminium ……50

III.5- La morphologie d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat……...51

III.6-Validation de l'impact de gouttes……..51

III.6.1Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus…….52

III.7-Etude de l'impact de la gouttelette d'alummin creuse……..53

III.7.1La température d'are T=300°C…….…..55

III.7.2.La température d'are T=400°C……59

III.7.3La température d'are T=500°C…….62

III.7.4. La température d'are T=600°C……...66

III.7.5.Température de substrat T=300°C ……71

III.7.6.Température de substrat T=400°C ……....75

III.7.7.Température de substrat T=500°C ……....79

III.7.8.Température de substrat T=600°C ……83

III.7.Conclusion……...88

La licite des figures

figure I.1 : Projection de poudre à la flamme Source……5

Figure I-2: Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes fonctionnels……9

Figure I-3 : Principe de formation de dépôt par projection plasma……10

Figure I-4 : Ordre des échelles de temps lors de la formation du dépôt par projection……11

Figure I-5 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé ……...11

Figure I-6 : Conductivité thermique des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculée avec T&TWinner……12

Figure I-7: Enthalpies massiques des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculées avec T&TWinner……....13

Figure I-8 : Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma……....14

Figure I-9 : Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma à courant continu……..15

Figure I-10: Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc..15

Figure I-11 : Evolution de la tension d'arc pour les différents modes de fonctionnement de l'arc dans une torche d.c selon……..17

Figure I-12 : Ré-accrochage du pied d'arc avec émission de bouffées de plasma….18

Figure I-13 : Différents types de claquage de l'arc dans une torche à plasma d'arc..18

Figure I-14 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1. Écoulement laminaire, 2. Début de développement de la turbulence, 3. Ecoulement cisaillé turbulent, 4. Ecoulement pleinement développé……....19

Figure I-15: Principe de la torche à trois anodes (Delta Gun)……..20

Figure I-16 : Torche APG selon Metco……21

Figure I-17 : Schéma de principe de la torche TRIPLEX (selon Sultzer-Metco)….22

Figure I.18 *:* Influence du débit de gaz porteur sur la trajectoire moyenne des particules……...23

FigureI.19: Schéma des particules en périphérie…….. .24

Figure I-20 : Rapport des différentes forces à la forces de trainé en fonction du diamètre d'une particule de zircone dans un plasma Ar-25%H2 de température 5000 K et pour une vitesse relative plasma particule de 500 m/s…….28
Figure I-21: Les échelles de temps des phénomènes physiques en projection plasma…….30
Figure I-22: Photographie de particules de molybdène injectées dans un jet plasma prise avec « Control Vision set-up » - déviation du flash laser de 5 µs . ……31
Figure I-23: Influence de vitesse et température des particules d'alumine projetées par plasma avant impact sur la morphologie des lamelles……..32
Figure I-24 : Morphologies de lamelles obtenues sur un substrat en acier……..34
Figure II.1: Les méthodes de représentation des interfaces…….41
Figure II.2 : Morcellement de goutte par schéma VOF……..42
Figure III.1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS ……..….49
Figure III.2 : la configuration utilisée pour la simulation de l'impact de goutte sur substrat……..….51
Figure III.3 : impact séquentielle d'une goutte de aluminium de 2.2 mm de diamétre avec une vitesse initiale 4m /s et une température de 519°C sur un substrat en acier initialement à 298°C……52
Figure III.4 : comparaison entre les diamètre des contacte d'ètalment dans les memes conditions. ……53
Figure III.5 : impact de la gouttelette d'alummin creuse……. .54
Figure (III.6) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T=300 °C sur un substrat……. 55
Figure III.6.a: graphe de température au point T_0……. 56
Figure III.6.b: graphe de température au point T1……...56
Figure III.6.c: graphe de température au point T_2. ……..56
Figure III.6.d: graphe de température au point T_3. ……56

Figure III.6.e: graphe de pression au point P_{-1}. ……..…..57

Figure III.6.f: graphe de pression au point P_0. . …….. …….57

Figure III.6.g: graphe de pression au point P_1. …… ……. 57

Figure III.6.h: graphe de pression au point P_2. . …… …… 57

Figure (III.7) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T=400 °C sur un substrat……..59

Figure III.7.a: graphe de température au point T_0. ……..60

Figure III.7.b: graphe de température au point T_1 ……...60

Figure III.7.c: graphe de température au point T_2…… 60

Figure III.7.d: graphe de température au point T_3…… 60

Figure III.7.e: graphe de pression au point P_{-1}…… 61

Figure III.7.f: graphe de pression au point P0……...61

Figure III.7.g: graphe de pression au point P_1. ……... 61

Figure III.7.h: graphe de pression au point P_2…… 61

figure III .8 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température d'aire à T=500°C sur un substrat …….62

Figure III.8.a: graphe de température au point T_0…… 63

Figure III.8.b: graphe de température au point T1……63

Figure III.8.c: graphe de température au point T_2……... 63

Figure III.8.d: graphe de température au point T_3……..63

Figure III.8.e: graphe de pression au point P_{-1}. …… 64

Figure III.8.f: graphe de pression au point P0……64

Figure III.8.g: graphe depression au point P_1. ……..64

Figure III.8.h: graphe de pression au point P_2…..……64

Figure III .9 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T=600°C sur un substrat avec une vitesse de 4m /s ….……..66

Figure III.9.a: graphe de température au point T_0…..…… 67

Figure III.9.b: graphe de température au point T_1…..……67

Figure III.9.c: graphe de température au point T_2…..…… 67

Figure III.9.d: graphe de température au point T_3…..……....67

Figure III.9.e: graphe de pression au point P_{-1}……68

Figure III.9.f: graphe de pression au point P_0……**.**68

Figure III.9.g: graphe de pression au point P_1. …….. 68

Figure III.9.h: graphe de pression au point P_2…..……...68

Figure III.10.a : diamètre de contacte d'étalement pour T=300°C…. 69

Figure III.10.b diamètre de contacte d'étalement pour T=400°C…….96

Figure III.10.c : diamètre de contacte d'étalement pour T=500°C…..96

Figure III.10.d : diamètre de contacte d'étalement pour T=600°C….96

Figure (III.11) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T =298°C sur un substrat de température à t=300°C ……71

Figure III.11.a: graphe de température au point T_0. ……..72

Figure III.11.b: graphe de température au point T_1……72

Figure III.11.c: graphe de température au point T_2…….73

Figure III.11.d: graphe de température au point T_3…….....73

Figure III.11.e: graphe de pression au point P_{-1}. ……..73

Figure III.11.f: graphe de pression au point P_0…….…73

Figure III.11.g: graphe de pression au point P_1. ……. 74

Figure III.11.h: graphe de pression au point P_2……..74

Figure III.12 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T=298°C sur un substrat de température à t=400°C…….75

Figure III.12.a: graphe de température au point T_0. ……..….76

Figure III.12.b: graphe de température au point T_1……76

Figure III.12.c: graphe de température au point T_2. ……..77

Figure III.12.d: graphe de température au point T_3…….77

Figure III.12.e: graphe de pression au point P_{-1}…… 77

Figure III.12.f: graphe de pression au point P_0…….77

Figure III.12.g: graphe de pression au point P_1. ……..78

Figure III.12.h: graphe de pression au point P_2……...78

Figure (III.13) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T=298°C sur un substrat de température à T=500°C…….79

Figure III.13.a: graphe de température au point T_0. ……...80

Figure III.13.b: graphe de température au point T_1.....80

Figure III.13.c: graphe de température au point T_2……... 80

Figure III.13.d: graphe de température au point T_3……..80

Figure III.13.e: graphe de pression au point P_{-1}. ……. 81

Figure III.13.f: graphe de pression au point P_0……81

Figure III.13.g: graphe de pression au point P_1. ……81

Figure III.13.h: graphe de pression au point P_2……81

Figure (III.14) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à t =298°C sur un substrat de température à t=600°C…… 82

Figure III.14.a: graphe de température au point T_0…… 83

Figure III.14.b: graphe de température au point T_1……..…….83

Figure III.14.c: graphe de température au point T_2…… 83

Figure III.14.d: graphe de température au point T_3……83

Figure III.14.e: graphe de pression au point P_{-1}. ……...84

Figure III.14.f: graphe de pression au point P_0……...…84

Figure III.14.g: graphe de pression au point P_1. ……..…85

Figure III.14.h: graphe de pression au point P_2…….85

Figure III.15.a : diamètre de contacte d'étalement pour T=300°c…… 85

Figure III.15.b : diamètre de contacte d'étalement pour T=400°c……85

Figure III.15.c : diamètre de contacte d'étalement pour T=500°c……86

Figure III.15.d : diamètre de contacte d'étalement pour T=600°c……86

La liste des tables :

Tableau III.1. Paramètres physiques de l'Alumine.

Tableau III.2 : les coordonnée des points de température et le pression.

Introduction générale

La projection plasma est un procédé de traitement de surface employé dans de nombreux secteurs industriels (aérospatiale, aéronautique, automobile, minier, biomédical, …). Elle permet de réaliser un apport de matière de quelques dixièmes à quelques millimètres d'épaisseur sous forme de couches fonctionnelles ou de protection pour différentes applications. Cette technique produit des dépôts de haute valeur ajoutée. Elle est flexible et permet de déposer une très large gamme de matériaux (céramiques, métaux, polymères, composites) sur des substrats de natures diverses et de tailles très différentes qui vont du millimètre à quelques mètres.

Les surfaces traitées, soumises à des sollicitations variées, permettent de gagner en performances, typiquement en:

• résistance à la corrosion chimique et à l'oxydation atmosphérique ;

• résistance à l'usure, aux frottements et à l'érosion ;

• tenue à des températures supérieures à 1300 K ;

• isolation et protection thermique.

Un dépôt réalisé par projection plasma est constitué par l'empilement de particules, qui s'écrasent avec des vitesses qui s'étendent de 100 à 350 m.s-1 selon leurs tailles, leurs masses volumiques et les torches plasmas utilisées, fondues ou partiellement fondues sur le substrat à couvrir et préalablement préparé à cet effet. La microstructure et les propriétés du dépôt sont fortement liées aux paramètres du substrat (nature, état chimique de la surface ou couche d'oxyde formée : épaisseur, nature, rugosité, température, …) et aux paramètres des particules (taille, vitesse, température, état de fusion à l'impact, …). Ces derniers paramètres sont eux-mêmes fonctions des caractéristiques du jet de plasma (composition, champs de vitesse et température, enthalpie, conductivité thermique, viscosité, …) et des conditions de leur injection (vitesse moyenne d'injection, point d'injection, distribution de taille des particules, …).

L'industrie de la projection plasma est confrontée à des besoins croissants de performance et à des exigences de plus en plus sévères. La réponse à ces contraintes impose une meilleure compréhension des phénomènes impliqués dans le processus de projection plasma (fluctuations du pied d'arc, phénomène de dispersion des particules de poudres, interaction particule-plasma, impact des particules sur le substrat, …), ainsi que de meilleurs outils de diagnostic et de prévision (contrôle en ligne et modèle numérique). C'est la tâche que s'est proposée le laboratoire SPCTS (Sciences des Procédés Céramiques et Traitement de Surface)

qui travaille depuis plus de trente ans sur les procédés de traitements des matériaux par plasma et ses travaux expérimentaux et de simulations ont couvert les différents domaines du procédé avec successivement les réacteurs plasmas [10, 11, 12, 13, 14], l'étude de la thermodynamique chimique et des propriétés de transport en plasma et la base de données T&TWinner [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] l'arc électrique [22, 23], la formation du jet plasma [24], la conception et la métrologie des torches plasmas [25, 26, 27, 28], le traitement des particules en vol [29, 30] et leur impact sur le substrat [31, 32, 33 , 34, 35], Cette production a été possible parce que le laboratoire s'est toujours équipé de moyens

de diagnostic et de contrôle en ligne et qu'il a développé des outils numériques de complexité variable dont il avait besoin. Ainsi, les modèles les plus complexes permettent des simulations tridimensionnelles transitoires qui prennent en compte la complexité des phénomènes physiques impliqués dans le procédé de projection plasma (fluctuation du pied d'arc, interaction gaz porteur-jet plasma, …) [36, 37, 38] mais présentent l'inconvénient de temps de calcul conséquents ce qui les rend incompatibles avec les besoins industriels. Les modèles simplifiés [39, 40] en 2D pour le plasma et en 3D pour les particules, ne tiennent pas compte de l'effet du gaz porteur, mais avec un coût de calcul réduit leurs résultats sont en assez bon accord avec ceux des codes tridimensionnels. C'est pourquoi ils constituent un outil d'assistance pour les industriels et une aide pour optimiser, plus rapidement que par des essais, les conditions de travail.

Le premier chapitre est consacré à un rappel bibliographique des différentes phases de la projection plasma et des différentes composantes fonctionnelles du procédé afin de mettre en lumière l'état de l'art en matière de modéles.
Deuxième chapitre est consacré à la description du modèle physique utilisé pour simuler l'impact de gouttes en général puis les principales méthodes de résolution numériques utilisées pour résoudre ce type d'équation présentées dans la littérature y compris celle utilisée dans ce travail.

Le troisième chapitre rassemble les résultats de la simulation numérique de l'impact et de l'étalement des particules d'Alumine et la formation des lamelles sur le substrat qui font l'objet de notre travail de mémoire .

Finalement, le chapitre IV propose une conclusion générale sur notre travail de simulation numérique puis des recommandations pour le futur sont formulées en vue d'améliorer les résultats obtenus.

I. La projection plasma

I. 1- La projection thermique :

La projection thermique fait partie des techniques de traitements de surfaces par voie sèche. Elle regroupe plusieurs procédés qui ont tous en commun de fondre un matériau d'apport puis de le projeter sous forme de gouttelettes grâce à un gaz vecteur. En principe, tous les matériaux dont la température de fusion est séparée d'au moins 300 °C de leur température de décomposition ou de vaporisation, peuvent être projetés. Le dépôt est formé par un empilement successif de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux, ce qui conduit à une structure lamellaire. L'adhérence du revêtement est obtenue essentiellement par un phénomène mécanique et la surface des pièces est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et favoriser l'accrochage.

Les applications de la projection thermique sont très variées :
revêtement contre l'usure, protection contre la corrosion et la chaleur, revêtement à propriétés électriques, réparation de surfaces endommagées... Et ces procédés sont utilisés dans de nombreux secteurs: mécanique (rouleaux de laminoirs, guides fils, pompes, pistons…), aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique…), biomédical (prothèses, couches biocompatibles…), industrie nucléaire (protection contre la corrosion et l'usure, réacteurs chimiques…).

I. 2. Les différents procédés :

Il existe de nombreux procédés de projection thermique qui sont différenciés principalement par la source d'énergie mise en oeuvre (combustion, décharge électrique). Les trois principaux sont **la projection par flamme, par arc électrique et par plasma**. Le transfert thermique entre les particules projetées et le substrat étant relativement faible, la pièce revêtue ne subit, normalement, ni déformation, ni changement de structure, ni altération majeure.

I. 2. 1. La projection par flamme :

Dans ce type de projection thermique, une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre soit sous forme de fil, de tige ou de cordon (pour les céramiques dans ces deux derniers cas). Dans le premier cas, la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme alors que dans le second, il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme. Les matériaux déposés par cette technique sont usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion.

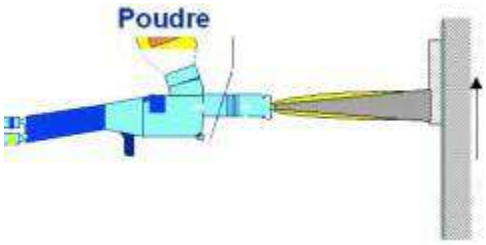


figure I.1 :Projection de poudre à la flamme Source

I .2. 1. 1- La projection flamme-poudre :

Le matériau à projeter est introduit sous forme de poudre dans une flamme oxygène gaz combustible, les particules sont accélérées grâce au gaz porteur ou à une injection d'air.

Les dépôts réalisés présentent une faible adhérence (de 20 à MPa) et une porosité élevée(10 à 20 %), ceci est essentiellement du aux faibles vitesses d'impact des particules (de l'ordre de 30 m.s-1)

I. 2. 1. 2- La projection flamme-fil :

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

I .2. 1. 3 - Projection supersonique par combustion :

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 m.s-1) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée (0,5 à 1 MPa). La chambre de combustion est refroidie et les gaz s'évacuent par une tuyère convergente-divergente suivie d'un fût de quelques dizaines de centimètres destiné à limiter l'entraînement de l'air ambiant. La poudre est injectée dans la flamme, à l'aide d'un gaz neutre porteur, soit en amont (distribution à une pression supérieure à celle de la chambre de combustion) soit en aval (distribution au voisinage de la pression atmosphérique). On distingue deux procédés :

• le procédé HVOF : High Vélocité Oxy-fuel Flamme, il utilise la combustion à l'oxygène d'un carburant gazeux tel que : propane, propylène, tétrène, méthane ou l'hydrogène ou liquide : généralement du kérosène

• le procédé HVAF : High Vélocité Air-fuel Flamme, la combustion est assurée par un mélange kérosène-air comprimé.

Dans les deux cas, les vitesses des particules sont comprises entre 300 et 600 m.s-1 ce qui permet un bon écrasement des particules dans un état plastique

I. 2. 1. 4- Le canon à détonation :

Le matériau d'apport, sous forme de poudre, et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits pratiquement en même temps dans un tube (tube de détonation) fermé à une extrémité. Grâce à une étincelle le mélange de gaz explose créant une onde de choc maintenue par la combustion. L'évacuation du gaz brulé, l'introduction du gaz explosif frais ne permet de renouveler l'explosion que jusqu'à 8 fois par seconde. Les particules de poudres sont ainsi chauffées et éjectées à une grande vitesse (jusqu'à1200 m/s) par l'onde de choc créée qui se déplace à des vitesses pouvant atteindre 2900 m.s-1. Les dépôts obtenus sont compacts (porosité inférieure à 1 %), de bonne adhérence (généralement supérieure à 80 MPa) et de faible rugosité (Ra = ± 3 μm). Les taux de dépôt horaires sont compris entre 3 et 5 kg.h-1 et l'épaisseur de dépôt est généralement inférieure à 0,2 mm

Ce procédé présente des contraintes aux niveaux des installations (dimensions, bruit de plus de 140 dB, …) ce qui réserve son utilisation à des sites spécialisés.

I.2.2. La projection par arc électrique :

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

I. 2. 2.1 - La projection arc-fil :

Dans ce procédé, deux fils constitués du matériau à projeter servent d'électrodes aux bornes desquelles une tension continue de 25 à 40 V est appliquée, ce qui crée un arc à leurs extrémités. Un gaz d'atomisation soufflé entre les deux fils permet de détacher la partie fondue sous forme de gouttelettes puis de les transporter jusqu'au substrat. Les taux de déposition sont élevés (jusqu'à 20 kg.h-1) et les dépôts réalisés sont épais (0,5 mm à 3 mm). Les matériaux projetés doivent être conducteurs électriques et tréfila blés (zinc, aluminium, cuivre, molybdène et acier), l'utilisation des fils fourrés constitués d'une gaine métallique ductile garnie de poudres de matériaux non-ductiles permet de réaliser des dépôts d'alliages (NiCrAl, NiMoAl, FeCrMn) ou des dépôts métalliques renforcés par des céramiques (carbures, …)

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

Dans ce procédé, la source de chaleur est un arc électrique alimenté en courant continu qui éclate entre une anode et une cathode, créant ainsi un plasma, généralement initié par une décharge haute tension (7000-8000 V) et haute fréquence (quelques MHz). Une partie du flux du gaz plasmagène est portée à haute température (au-delà de 8000 K, la majorité des gaz plasmagènes est conductrice électriquement) et est constrictée dans la tuyère anode. En aval du pied d'arc et en sortie de tuyère, un jet de plasma de recombinaison est généré dont la vitesse, selon les conditions de tir et le diamètre interne de la tuyère, varie entre 1000 et 2500 m/s, vitesses subsoniques à ces températures. Au sein de ce jet plasma est injecté (généralement perpendiculairement au jet) le matériau d'apport sous forme d'une poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules fondues ou semi-fondues sont projetées à grande vitesse (de l'ordre de 100 à300 m.s-1) sur le substrat où elles s'écrasent pour constituer le dépôt. Les gaz plasmagènes utilisés sont, en général, des mélanges binaires ou ternaires constitués d'un gaz primaire de densité massique élevée (argon, azote) et d'un gaz secondaire (hydrogène, hélium) destiné à améliorer le transfert thermique plasma-particule. Le jet plasma est utilisé à l'air ambiant (APS : Air Plasma Spraying), ou en atmosphère contrôlée (argon,

azote, …), sinon sous vide partiel (20-50 kPa) ou en surpression jusqu'à 4 105 Pa). Par rapport aux procédés déjà cités, la projection par plasma d'arc se distingue par :

• un jet de plasma à enthalpie (> 1 MJ.kg-1) et température (8000 <T< 14000°C) très élevées ce qui permet de fondre tout les matériaux céramiques et les alliages réfractaires (densité d'énergie de quelques MW.m-3)

• des vitesses des gaz de l'ordre de 400 à 2500 m.s-1 et donc des vitesses de particules relativement élevées 150 à 300 m.s-1 pour les torches à cathode tige et 250 à 500 m/s pour les torches à cathode bouton ;

• des dépôts minces (> 50 μm) ou épais (jusqu'à quelques millimètres)

• une large gamme de matériaux projetés.

Le paragraphe suivant décrit de façon plus détaillée les composantes, le fonctionnement et les caractéristiques du procédé de projection plasma.

I.2.3-La projection plasma :

I.2.3.1- Principe :

Les premières torches plasma à courant continu (direct current : d.c.) sont apparues dans les années 60 et les premières torches de projection au milieu de la décennie et enfin une décennie plus tard, la projection plasma sous vide partiel a été introduite. La robotisation du procédé a commencé dans les années 80 parallèlement au développement des torches radio fréquence (RF) pour la projection.

Les travaux des années 90 ont été orientés vers le développement des détecteurs et outils de diagnostic susceptibles de résister à l'atmosphère agressive des cabines de projection, cette décennie a vu aussi l'émergence de nouvelles torches d.c. (injection axiale Mettech, torche de petite dimension et rotative pour la projection sur des surfaces cylindriques, torches à trois cathodes et tuyère segmentée :

Triplex de Sultzer Metco) et des torches RF supersoniques. Enfin, au début de ce millénaire, les efforts portent sur l'amélioration de la fiabilité et de la reproductibilité du procédé via le développement des outils de contrôle en ligne (comportant des détecteurs de haute sensibilité) ainsi que l'élaboration de nouveaux procédés visant la réalisation de dépôts finement structurés sinon nanostructures[1]. En raison de ces évolutions et de la flexibilité de cette

technique, de nombreuses industries ont recours à la projection Plasma pour réaliser des dépôts généralement à haute valeur ajoutée, Pour différentes applications comme les barrières thermiques, la résistance à l'usure, à la corrosion et/ou l'érosion, les applications électriques, les prothèses humaines … La projection plasma est aussi utilisée pour la restauration des pièces fonctionnelles usées ou endommagées.

Dans le procédé de projection plasma, il est possible de distinguer quatre systèmes fonctionnels :

• la génération du jet plasma par la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique ;

• l'injection de la poudre dans le jet ;

• l'écoulement du jet plasma et l'interaction avec le gaz environnant et avec la poudre ;

• l'élaboration du dépôt par empilement des lamelles sur le substrat.

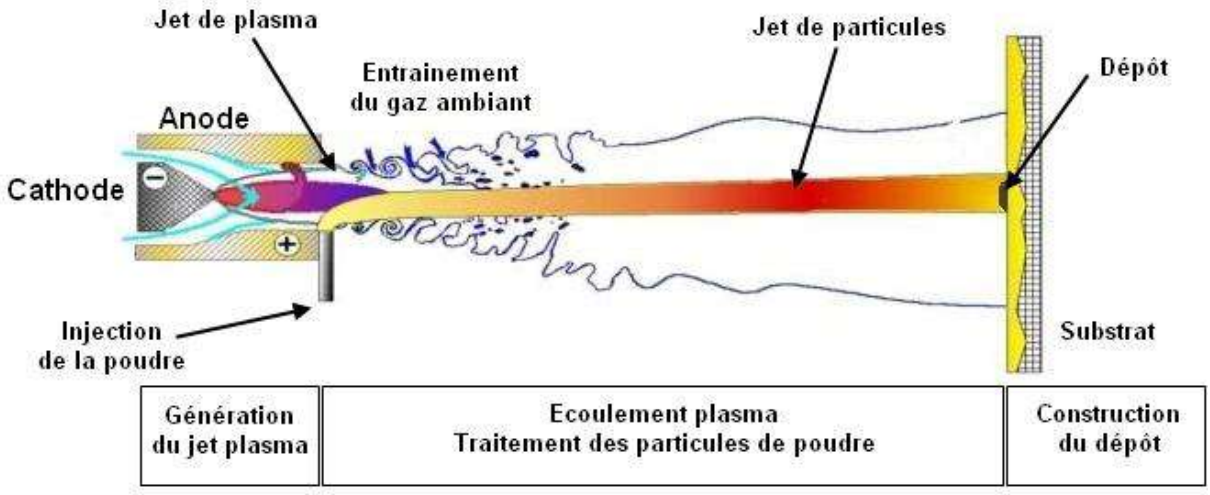


Figure I-2: Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes fonctionnels

La maîtrise de la qualité d'un dépôt réalisé par projection plasma passe par celle des différentes fonctions du procédé par le truchement de la microstructure qui est le résultat des paramètres liés à la particule (taille, vitesse, température, état de fusion,…), au substrat (température, rugosité, chimie de surface,…) et à la torche (puissance, débit et composition des gaz plasmagènes, ...). La complexité du procédé de projection plasma résulte de l'ordre de grandeur des températures et des vitesses rencontrées ainsi que des temps caractéristiques

extrêmement faibles qui en résultent, comme le montrent les Figure I-3 et Figure I-4 En effet, selon sa vitesse d'injection, le temps de séjour d'une particule dans le jet de plasma est compris entre 0,1 ms et quelques millisecondes. La Figure I-3 récapitule les temps caractéristiques de la projection plasma conventionnelle qui varient de la microseconde pour l'impact d'une particule à plusieurs secondes, voire plusieurs heures pour la construction du dépôt[5], selon la taille de la surface à traiter qui peut varier de quelques centimètres carrés à quelques dizaines de mètres carrés.

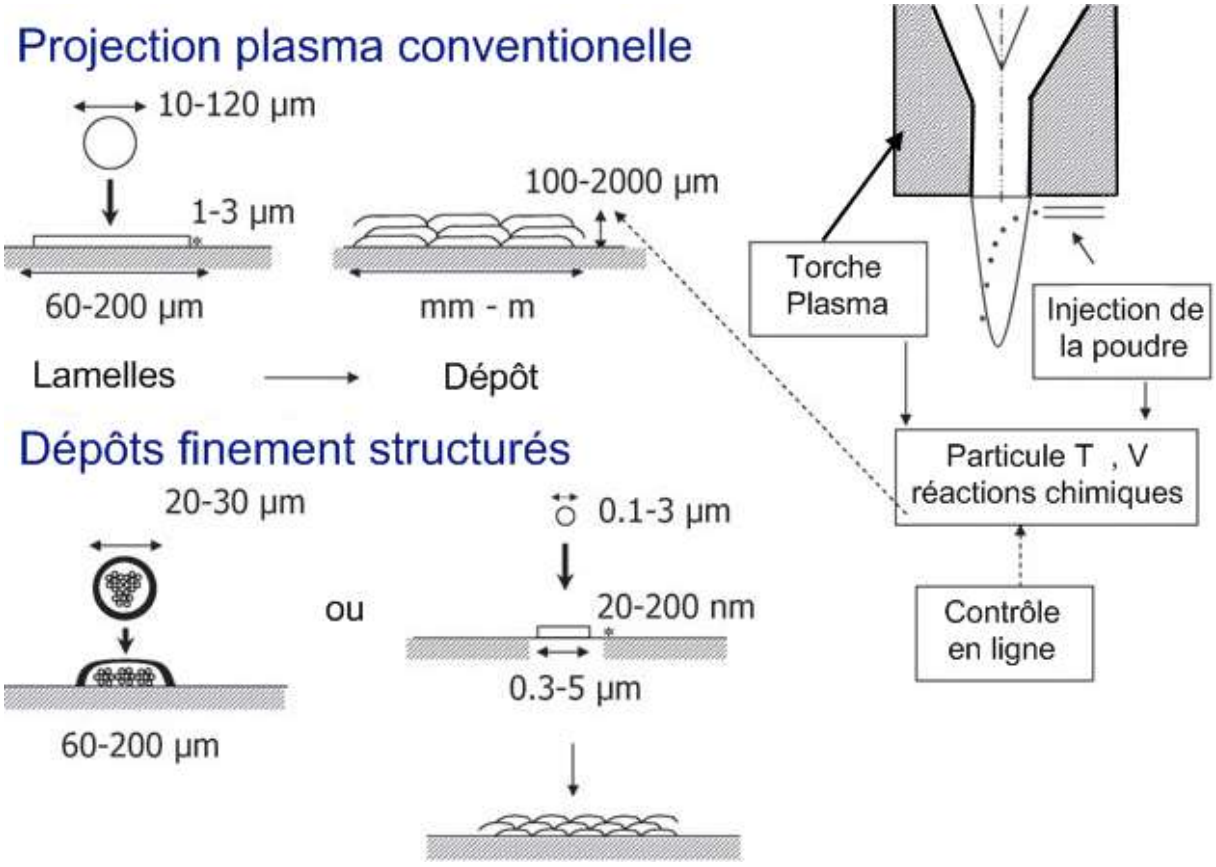
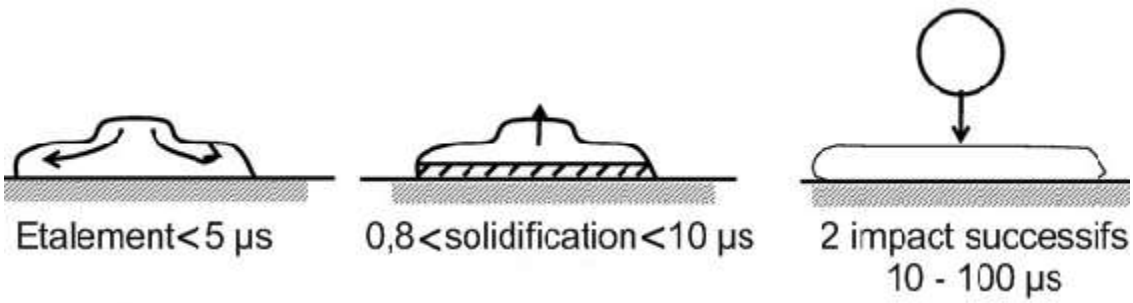


Figure I-3 : Principe de formation de dépôt par projection plasma [1]



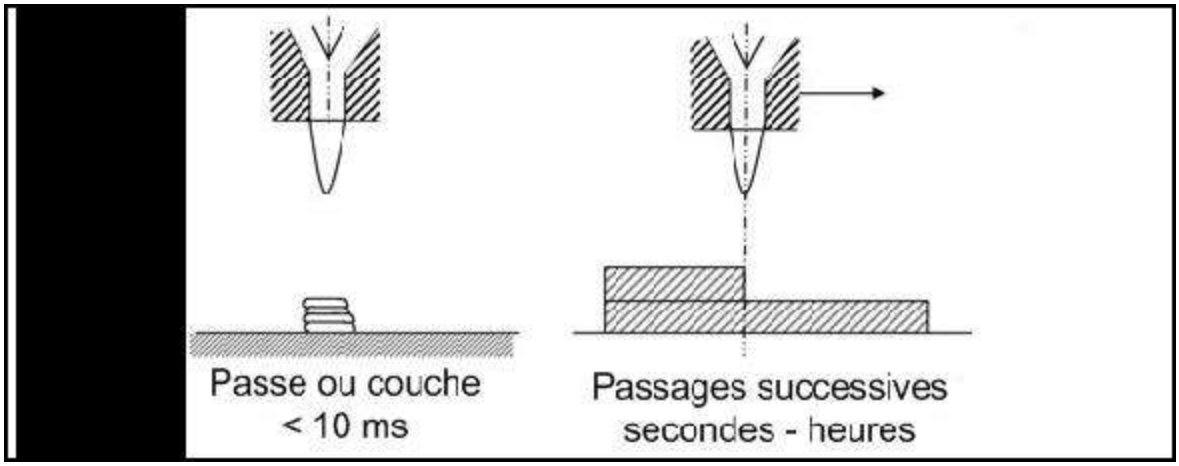


Figure I-4 : Ordre des échelles de temps lors de la formation du dépôt par projection

I.2.3.2- Fonctionnement de la torche à plasma d'arc :

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

Deux familles de torche sont à distinguer (Figure I-5) :

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

• Torche à arc soufflé : l'arc jaillit entre deux électrodes, une cathode et une anodetuyère, c'est celle que nous décrivons par la suite.

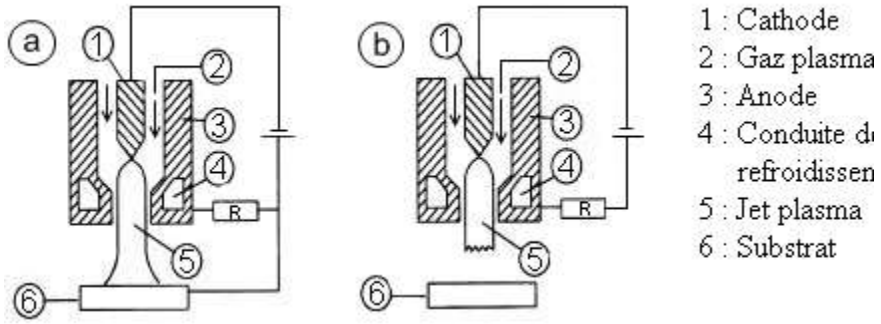


Figure I-5 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [6]

I.2.3.2.1- Amorçage de l'arc :

L'amorçage de l'arc est assuré par une surtension, supérieure à une tension critique appelée tension de claquage, appliquée entre les deux électrodes. La valeur de cette tension de claquage dépend de la nature du gaz plasmagène, de la pression et la distance inter-électrodes[7]. Cette surtension (6 à 10 kV) est appliquée à l'aide d'un circuit haute fréquence (plusieurs MHz) en série ou en parallèle avec l'arc et le générateur de courant. L'argon est souvent utilisé à l'amorçage car il érode peu les électrodes et qu'il s'ionise à plus faible énergie que les autres gaz plasmagènes (N2, H2, He).

I.2.3.2.2- Le gaz plasmagène :

L'argon est donc le gaz primaire le plus utilisé en projection plasma car il présente l'avantage d'être inerte[6]. Les propriétés thermo-physiques de l'hydrogène font de lui un gaz secondaire idéal pour augmenter l'enthalpie et la conductivité thermique du plasma sans pratiquement modifier sa température [8], ce qui permet d'améliorer le transfert thermique plasma-particules. La Figure I-6 montre, calculée avec le logiciel T&Twinner [9], l'effet de la teneur en hydrogène sur la conductivité du gaz plasmagène. Le pic vers 3500 K correspond à la dissociation de l'hydrogène et au-delà de 4000 K, la conductivité thermique intégrée du mélange, qui intervient dans le transfert plasma-particule, est multipliée par un facteur de 5 pour des teneurs d'hydrogène supérieures à 10 %.

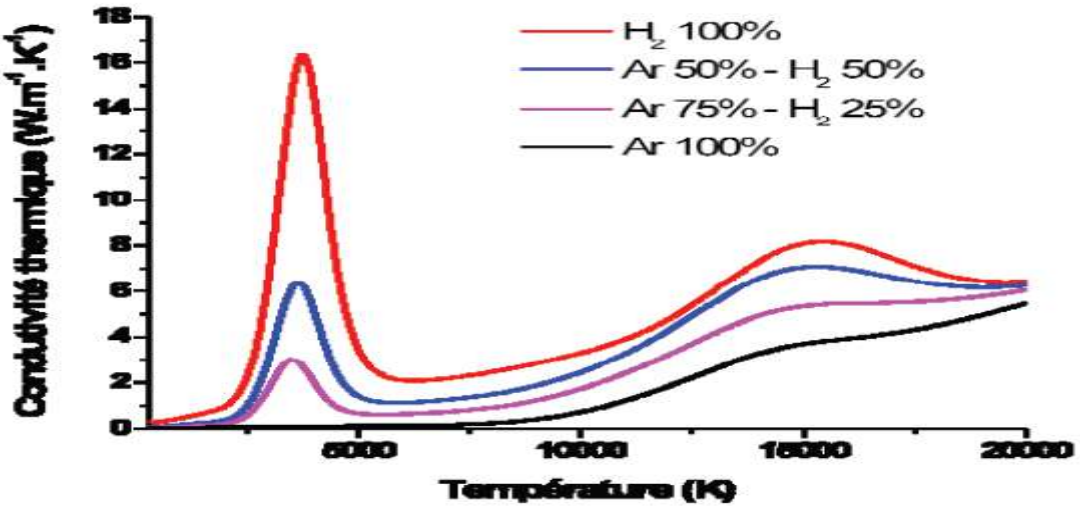


Figure I-6 : Conductivité thermique des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculée avec T&TWinner [9]

La Figure I-7 illustre la variation avec la température de l'enthalpie massique des mêmes gaz, à pression atmosphérique. L'augmentation du pourcentage d'hydrogène est accompagnée d'une forte variation de l'enthalpie massique. En effet, l'hydrogène accroît, de façon plus conséquente que l'argon, le pouvoir calorifique du plasma car il se dissocie avant ionisation, ce qui augmente l'enthalpie du plasma. En outre la masse d'une mole d'hydrogène étant 20 fois plus faible que celle d'une mole d'argon, pour une même puissance dissipée, l'enthalpie d'une mole d'hydrogène est vingt fois plus élevée que celle de l'argon.

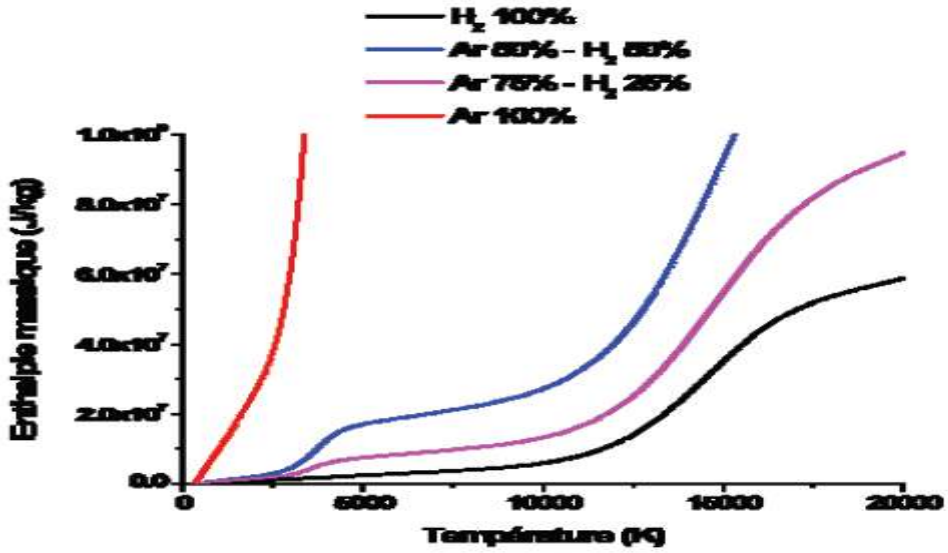


Figure I-7: Enthalpies massiques des mélanges Ar-H2 en fonction de la température, à pression atmosphérique calculées avec T&TWinner [9]

I.2.3.2.3 Injection des gaz :

Le mélange gazeux est injecté dans la torche au niveau de la cathode. Trois modes d'injection du gaz dans la chambre d'arc sont possibles (Figure I-8) :

• Injection axiale : la bague d'injection est percée de trous parallèles à l'axe de la cathode, les gaz ont donc une composante de vitesse longitudinale

• Injection radiale : la bague d'injection est percée de trous orthogonaux à l'axe longitudinal de la cathode, la vitesse présente au début une composante radiale importante qui s'atténue ensuite, mais beaucoup de turbulences sont générées au voisinage de la pointe de la cathode ;

• Injection en vortex : la bague d'injection est percée de trous dont l'axe présente un certain angle par rapport à l'axe longitudinal de la cathode, ce qui donne une composante de rotation à la vitesse du gaz plasmagène. L'intensité du vortex est mesurée à l'aide d'une grandeur appelé « vorticité » et notée « S » [10] qui présente le rapport de la quantité de mouvement angulaire sur la quantité de mouvement axiale. Elle est relativement faible avec ce type d'injection (S < 3).

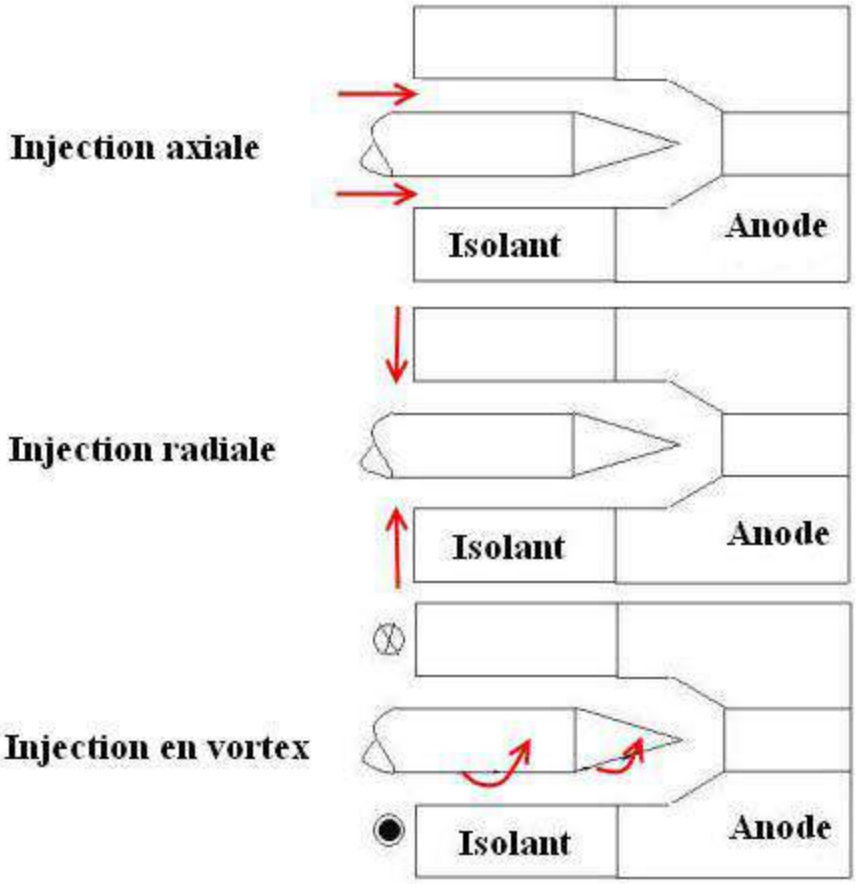


Figure I-8 : Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma .

I.2.4 Formation du jet plasma :

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

6000 K se développe autour de la colonne d'arc tandis qu'une partie du gaz plasmagène, s'écoule le long de l'anode. Une couche limite froide (Figure I-9), gaine la colonne d'arc et assure sa stabilité.

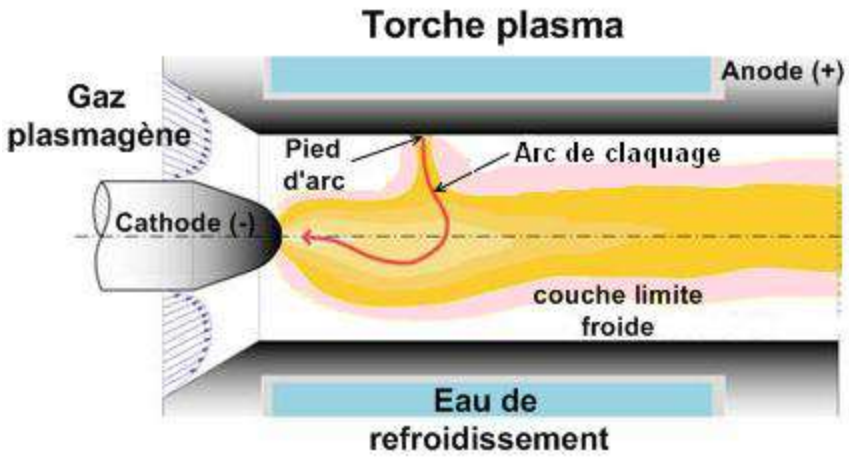


Figure I-9 : Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma à courant continu .

La boucle de plasma de connexion à l'anode, caractérisée par une température supérieure à la température d'ionisation (T > 8000 K) et sa faible densité massique (environ1/30 de celle du gaz froid), est soumise à des forces dynamiques liées à l'écoulement gazeux et aux forces électromagnétiques de Laplace souvent dites de Lorentz) dues à l'interaction entre le courant d'arc (et son champ magnétique (Figure I-10).

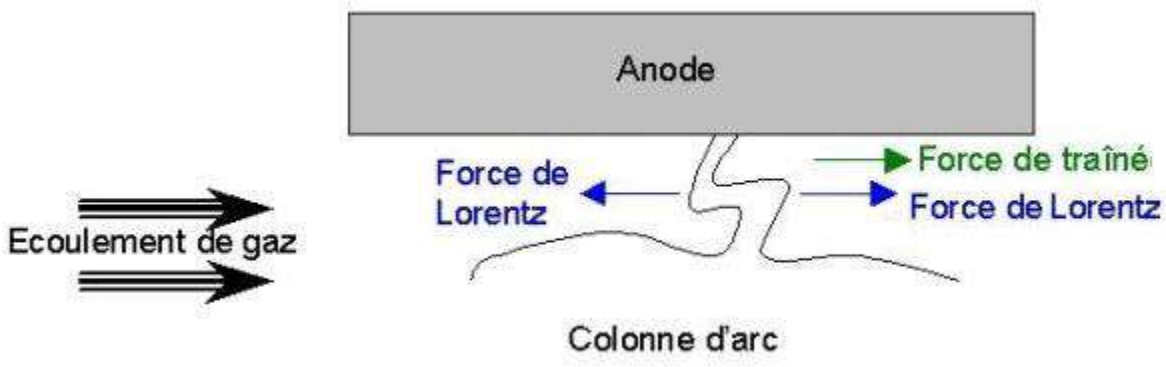


Figure I-10: Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc .

Wurtzke et Pfender[11] ont identifié expérimentalement trois modes de fonctionnement de l'arc, qui, d'après Duan et Heberlein [12], sont reliés à l'épaisseur de la couche limite froide qui gaine la paroi anodique interne et dont le réchauffement progressif introduit une instabilité

croissante de la colonne d'arc. Cette épaisseur de la couche limite froide diminue lorsque le rayon de l'arc électrique augmente et réciproquement. Ce dernier croît avec le courant d'arc I (environ comme √I) et décroît très légèrement avec le débit du gaz plasmagène et avec l'introduction des gaz diatomique (H2, N2) qui ont des conductivités thermiques élevées. Il dépend aussi du mode d'injection du gaz et de la géométrie de la tuyère.

Les trois modes de fonctionnement identifiés par Wurtzke et Pfender sont :

• Le mode stable (steady mode) (Figure I-11) : le pied d'arc est pratiquement stationnaire et aucune fluctuation de tension n'est observée. Ce mode est obtenu seulement pour des rayons électriques d'arc voisins du rayon de la tuyère et des couches limites[12] froides très fines, c'est-à-dire pour un fort courant d'arc, un faible diamètre de la tuyère ou un paroi de la tuyère chaude (T > 1800 K) la durée de vie de la tuyère est alors de quelques minutes;

• Le mode oscillant (take-over mode) (Figure I-11) : le pied d'arc présente un point d'attachement relativement large sur la paroi de la tuyère anodique. La tension d'arc évolue de façon presque sinusoïdale au cours du temps et le pied d'arc se transfère graduellement en un autre point d'attachement sur la paroi anodique sans disparaître instantanément, ce qui se traduit par des valeurs élevées de la température moyenne et du champ électrique dans la couche limite

. Ce mode présente des couches limites plus épaisses que celles du précédant mais plus minces que dans le mode claquage-réamorçage.

• Le mode claquage-réamorçage (restrike mode) : dans ce mode, la longueur de l'arc augmente jusqu'à l'apparition d'un court circuit qui engendre le ré-accrochage en un autre point et ainsi la tension d'arc présente une forme caractéristique en dents de scie (Figure I.11).

[13 14]Brilhac puis Planche[15] ont étudié la dynamique del'arc et ont noté que sur une tuyère neuve, le point d'accrochage se déplace de façon continue, cependant quand la paroi de l'anode s'est usée (c.à.d. après plus de 20 minutes de fonctionnement), le point d'accrochage de l'arc se fixe pendant la durée d'une rampe de tension et c'est alors la boucle de plasma (Figure I-10) qui se déplace en aval. La rampe de tension correspond ainsi à la déformation et à l'allongement de la colonne d'arc de connexion sous l'effet combiné des forces hydrodynamiques et électromagnétiques.

Chaque fois que la tension aux bornes de la boucle d'accrochage dépasse la tension de claquage dans la couche limite chauffée au voisinage de la tuyère, un nouveau point

d'accrochage est établi, latension chute brutalement et un volume de plasma se détache de la colonne d'arc

. Le jet de plasma résultant prend alors la forme de « bouffées de plasma » successives, (Figure I-12). Le mode claquage-réamorçage est généralement caractérisé par une couche limite froide relativement épaisse (25 à 30 % du rayon de l'arc).

Les observations expérimentales ont montré que la durée de vie d'un point d'accrochage est essentiellement fonction de l'épaisseur de la couche limite qui sépare la colonne conductrice de l'arc (T > 7000 K à 105 Pa) de la paroi de la tuyère [7], c'est-à-dire du rayon de l'arc électrique par rapport à celui de la tuyère. D'une manière générale, pour limiter l'érosion de l'anode sa durée de vie ne doit pas dépasser 160 μs pour une anode en cuivre.

Notons que, dans diverses conditions opératoires, des modes composés ou intermédiaires entre les trois modes précédemment décrits[16 17] sont observés. Pour des mélanges de gaz plasmagènes contenant des gaz diatomiques (H2, N2, …), le mode prépondérant de fonctionnement de l'arc est le mode claquage-réamorçage. Etant donné que ces gaz sont souvent utilisés en projection plasma, ce mode a été amplement étudié[18 19 20] . Hrabovsky et al.[21] ont étudié les mouvements du pied d'arc sur une anode externe rotative à l'aide d'une caméra vidéo rapide et observé l'intensité du rayonnement lumineux pour une torche fonctionnant avec de la vapeur d'eau et un courant d'arc variant de 300 à 600 A. Il a été montré que le mouvement rétrograde du spot anodique est plus rapide lorsque le courant d'arc augmente et lorsque la vitesse axiale du plasma augmente. La vitesse de déplacement du pied d'arc lors d'un claquage en aval varie ainsi entre 200 et 600 m.s-1 lorsque le courant passe de 200 A à 600 A.

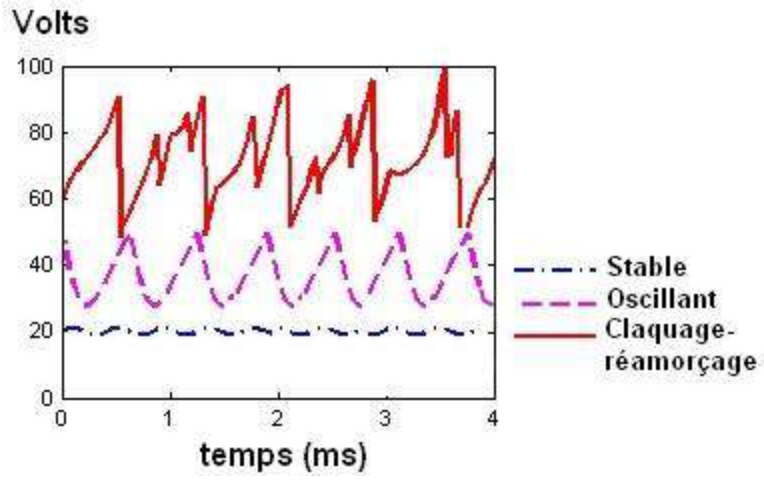


Figure I-11 : Evolution de la tension d'arc pour les différents modes de fonctionnement de l'arc dans une torche d.c selon [15].

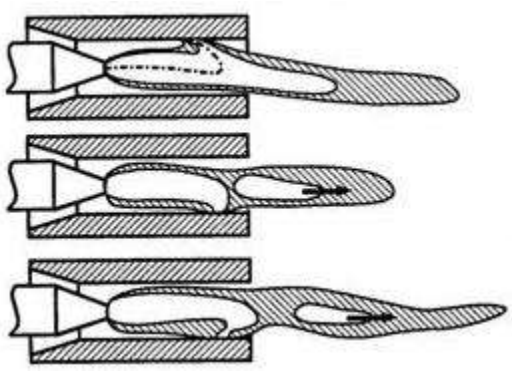


Figure I-12 : Ré-accrochage du pied d'arc avec émission de bouffées de plasma**.**

Au cours du déplacement de l'arc, le claquage se produit lorsque le champ électrique dans la couche de gaz entre la paroi anodique et la colonne du pied d'arc ou entre la colonne et le pied d'arc, dépasse le pouvoir isolant du gaz plasmagène. Deux types de claquages sont envisageables :

• Claquage entre la colonne et la paroi de l'anode (Figure I-13.a) :
la chute de pression est rapide et importante du fait de la valeur élevée de la tension de claquage dans la couche limite froide.

• Claquage entre la colonne et le pied d'arc (Figure I-13. b) ou entre le pied d'arc et la paroi (Figure I-13.c) : la chute de tension est plus faible et correspond aux petits pics entre deux «dents de scie » de la Figure I-11.

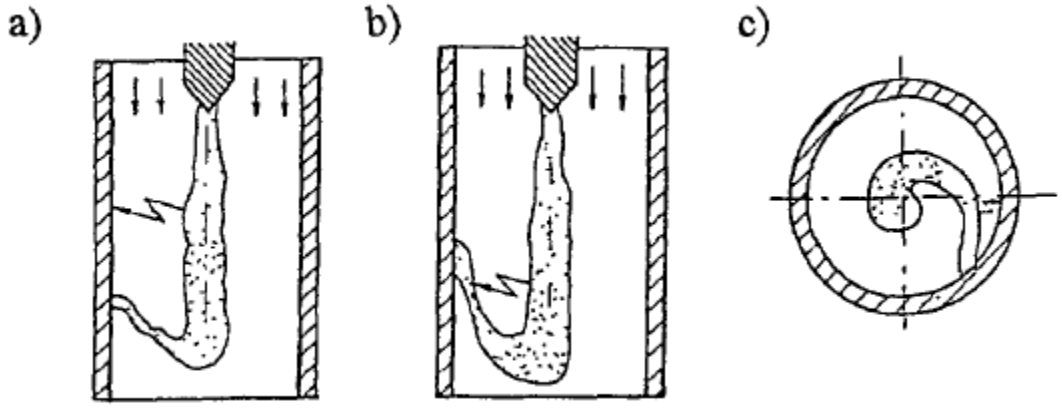


Figure I-13 : Différents types de claquage de l'arc dans une torche à plasma d'arc.

I.2.5- Ecoulement du jet plasma :

La Figure I-14 schématise l'écoulement du jet plasma dans l'atmosphère. Le jet formé dans la chambre d'arc (zone 1) sort avec une grande vitesse (500 à 2500 m.s-1) et entre en contact avec le gaz environnant froid et au repos (zone 2). La différence de vitesse entre le jet et les gaz froids environnants engendre, à la frontière du jet, la formation de tourbillons d'instabilités, appelés "tourbillons de Kelvin-Helmotz"[22]. Ces tourbillons grossissent en se déplaçant vers l'aval et l'écoulement devient turbulent. Ils engoufrent le gaz ambiant sous forme de bulles qui gardent, dans un premier temps, une masse volumique et une inertie supérieures (plus d'un ordre de grandeur) à celles du gaz plasmagène. Ces bulles, progressivement chauffées par le plasma, se cassent dans le jet en structures de plus en plus petites et augmentent le caractère turbulent au sein de l'écoulement (zone 3). Lorsque ces turbulences atteignent l'axe du jet, celui-ci perd son caractère laminaire. Il devient alors pleinement turbulent et l'entraînement croissant du gaz ambiant contribue à réduire sa vitesse et son enthalpie (zone 4)

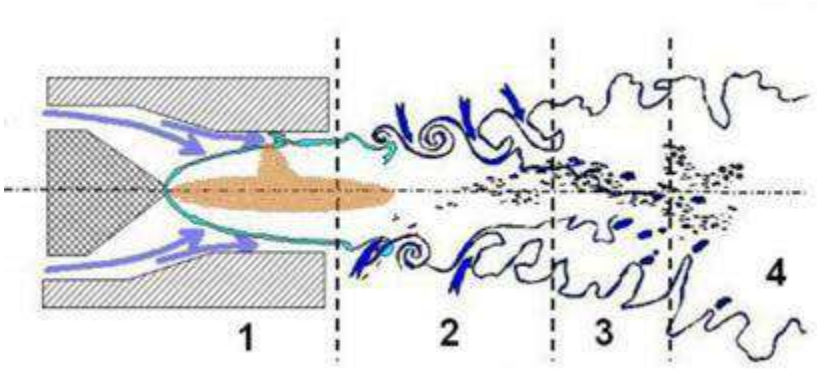


Figure I-14 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1. Écoulement laminaire, 2. Début de développement de la turbulence, 3. Ecoulement cisaillé turbulent, 4. Ecoulement pleinement développé.

I.2.6 Développement des torches de projection :

Les développements récents des torches de projection plasma à courant continu visent essentiellement à :

- Limiter les phénomènes d'instabilités ;
- Réduire l'érosion des électrodes, notamment celle de l'anode ;
- Augmenter la productivité des torches pour revêtir des pièces de grande dimension.

Améliorer la stabilité du jet plasma revient à réduire et limiter le déplacement de l'arc et en contre partie à augmenter l'érosion de la tuyère. Une des solutions qui permettent de stabiliser le jet avec une érosion acceptable consiste à répartir le courant dans trois arcs indépendants en utilisant trois anodes différentes (Delta Gun Concept), ce qui produit un lissage de l'écoulement par superposition de trois jets (Figure I-15).

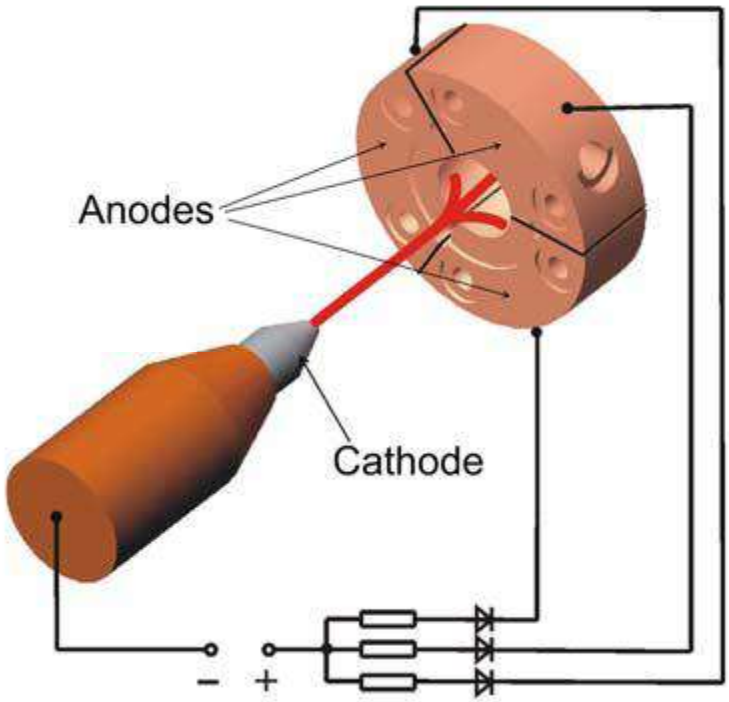


Figure I-15: Principe de la torche à trois anodes (Delta Gun).

Afin de réduire le mouvement axial de l'arc, certaines torches comportent une partie centrale isolante et segmentée, chaque segment isolé électriquement est à un potentiel flottant, entre l'anode et la cathode. L'arc est forcé de s'étirer vers l'anode placée en aval. Les segments isolés ont une épaisseur telle que le produit de celle-ci par le champ électrique moyen dans la

colonne d'arc soit inférieur à la somme des tensions de chute anodique et cathodique. La Figure I-16 représente une torche APG de Metco, qui exploite cette technique.

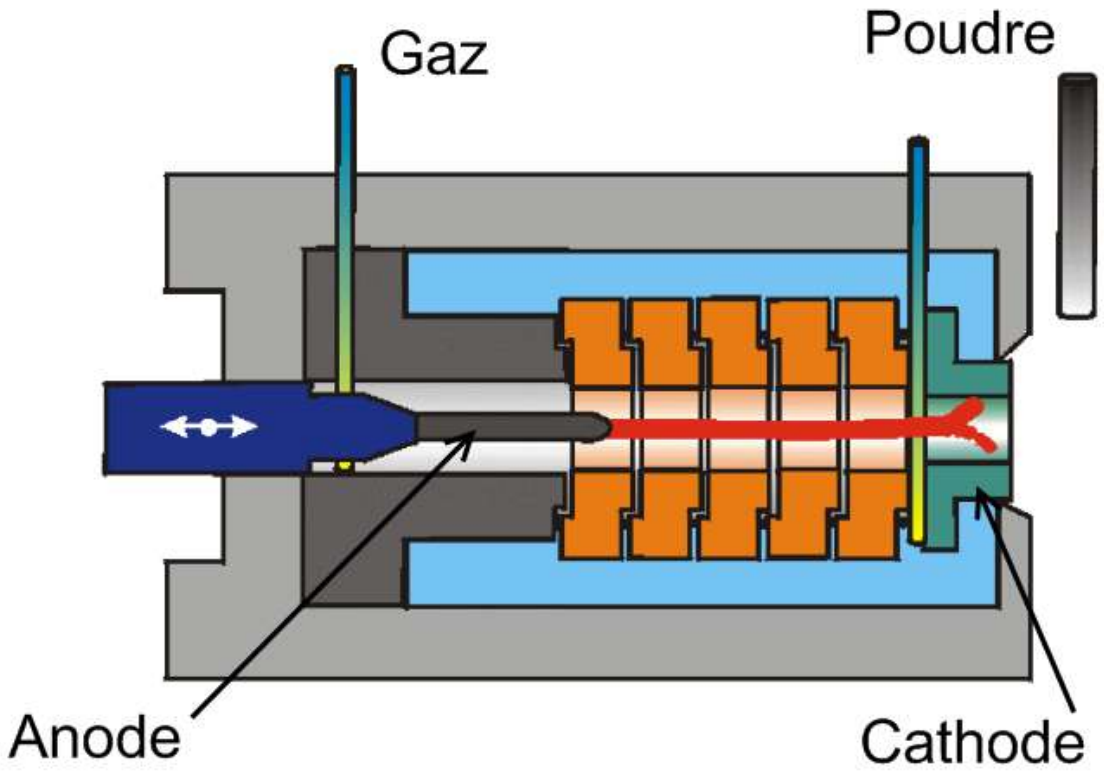


Figure I-16 : Torche APG selon Metco.

Un exemple de torche qui emploie les deux techniques précédemment cités est présenté sur la Figure I-17, c'est la torche TRIPLEX de Sulzer Metco[19]. La tuyère de cette torche est segmentée, elle est composée de plusieurs anneaux isolés électriquement et le dernier est porté à un potentiel positif et joue le rôle de l'anode. Trois cathodes limitent le courant qui passe dans chacune d'elle.

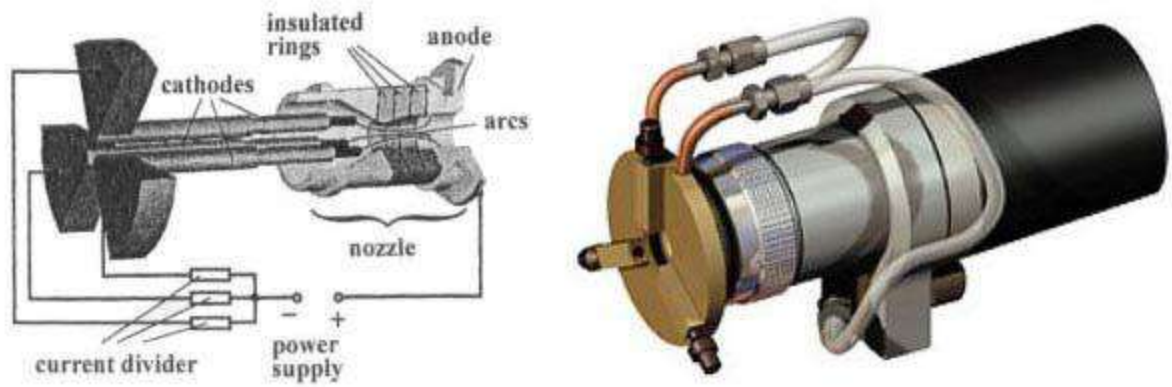


Figure I-17 : Schéma de principe de la torche TRIPLEX (selon Sultzer-Metco).

I.2.7-Traitement des particules dans le jet plasma :

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

I.2.7.1- Injection de la poudre :

Les matériaux utilisés pour la projection plasma d'arc soufflé se présentent généralement sous forme de fines particules (dont le diamètre peut varier de 5 à 110 µm environ) de granulométrie plus ou moins serrée. L'introduction de ces particules dans l'écoulement plasma se fait au niveau de la sortie de tuyère, au moyen d'un injecteur dans lequel circule un gaz porteur dense (généralement de l'argon). Pour limiter la dispersion des particules dans le jet, l'injecteur possède un faible diamètre interne (de 1,2 à 2 mm). Les paramètres d'injection contrôlent : à la fois la trajectoire, l'accélération et le traitement thermique des particules au sein du jet plasma et le rendement du dépôt. Le traitement thermique des particules au sein du jet plasma est effectué grâce aux transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le plasma et les particules solide. Le transfert de quantité de mouvement fixe à la fois la vitesse et le temps de séjour des particules au cœur du plasma, tandis que l'échange de chaleur gouverne l'état final (fondu ou non) des particules avant l'impact. Ces mécanismes de transfert sont déterminés grâce à la fois aux propriétés thermo-physiques des gaz plasmagènes (viscosité, conductivités thermique et électrique, densité massique…) à la température et vitesse du jet plasma qui

sont eux meme influencées par les fluctuations du pied d'arc.

Du fait des variations radiales et temporelles des propriétés qui caractérisent le jet plasma, les échanges plasma-particules sont optimaux au niveau de la zone centrale du jet qui est la plus chaude et la plus rapide. Les particules doivent donc rester un maximum de temps dans cette zone, pour qu'elles soient mieux traitées, avec comme résultat un meilleur rendement de dépôt.

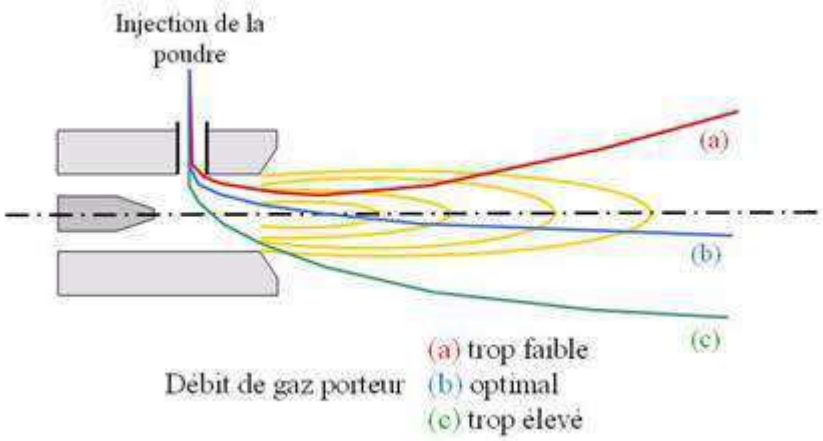
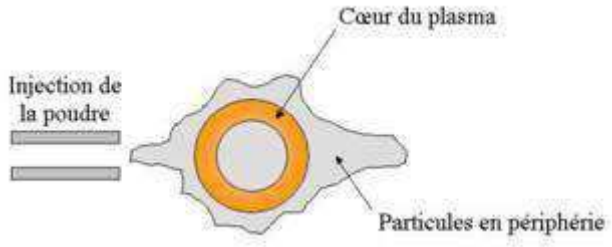


Figure I.18 : Influence du débit de gaz porteur sur la trajectoire moyenne des particules.

Comme le montre la FigureI.17, pour un plasma sans fluctuations, quand le débit est trop faible, les particules ne pénètrent pas dans le jet plasma et sont éjectées. Quand le débit est trop important, les particules traversent le jet plasma et ne sont pas traitées. La trajectoire optimale des particules correspond à un angle de 3-4 degrés par rapport à l'axe de la torche (trajectoire b). Le rôle du gaz porteur est donc de conférer aux particules une quantité de mouvement suffisante pour pénétrer dans le plasma. Les vitesses moyennes des particules sont quasi-indépendantes de leur taille en sortie d'injecteur mais, du fait des turbulences, les plus petites particules, en particulier celles dont la masse spécifique est faible, entrent en collision avec les parois créant ainsi un jet d'autant plus divergent en sortie d'injecteur qu'elles ont des tailles inférieures à 20 µm.

Par ailleurs, la vitesse d'injection des particules doit être ajustée en fonction de la quantité de mouvement qui leur est impartie par le plasma dans le but d'avoir le maximum de particules restant le plus longtemps possible au cœur du jet plasma. En effet, le problème majeur pour injecter les poudres dans le jet est de vaincre l'opposition du

plasma à leur pénétration qui est due à la quantité de mouvement imposée par plasma aux particules. Ces dernières doivent donc acquérir dans l'injecteur une quantité de mouvement suffisante et adaptée à leur granulométrie. Si cette quantité de mouvement est trop faible, les particules suivent les zones froides périphériques du plasma et ne sont que partiellement fondues à leur arrivée sur le substrat (figure I.19). De même, si cette quantité de mouvement est trop importante, les particules traversent le jet plasma et sont, là encore, mal chauffées. Les débits massiques des gaz plasmagènes et porteur, ainsi que la puissance dissipée, doivent donc être
optimisés afin que les particules soient injectées au cœur du jet.



FigureI.19: Schéma des particules en périphérie .

I.2.7.2 Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement plasma-particules :

La couche limite qui se développe autour de la particule se caractérise par un gradient important de température, la différence de température entre le gaz et la surface du particule peut atteindre 104 K, ce qui se traduit par des phénomènes de diffusion dans la couche limite et implique un écart à l'équilibre chimique fonction de l'ordre de grandeur des vitesses des réactions chimiques et de la vitesse de diffusion. Deux cas extrêmes peuvent être envisagés :
• la couche limite est en équilibre : quand les vitesses des réactions chimiques sont grandes devant les vitesses de diffusion, le gaz est sensiblement en équilibre. Les concentrations dans la couche limite ne dépendent alors que de la température et de la pression, le pouvoir catalytique de la paroi n'intervient pas puisque les concentrations à la paroi sont celles de l'équilibre.
• la couche limite est figée : dans ce cas les vitesses des réactions chimiques sont faibles devant celles de diffusion, ainsi le pouvoir catalytique de la paroi interviendil de façon

importante par les conditions qu'il impose pour les concentrations notamment des espèces chargées.

L'état de la couche limite qui entoure la particule est mal connu[33 34 35 36] il correspond à un état intermédiaire entre ces deux cas extrêmes, où le transfert de chaleur est fortement modifié [37]et où l'équilibre thermodynamique local ne peut plus être postulé.

I.2.7.3- Transfert de chaleur :

Plusieurs travaux[36 39 40] montrent qu'en absence de réactions chimiques surface, le chauffage par conduction convection dans la couche limite thermique est le mécanisme principal du chauffage de la particule dans le jet plasma. Alors que la particule, sous condition plasma, se refroidi par rayonnement vers le milieu ambiant, souvent le transfert à la radiatif du plasma vers la particule est négligé et le plasma est donc considéré comme optiquement mince.[41]En fonction du gaz plasmagène et de sa conductivité thermique, les particules sont soumises à des flux de chaleur très importants qui peuvent atteindre 108 W.m-2[42], ce qui entraîne leur évaporation et modifie ainsi le transfert thermique vers elles, en effet :

• Le flux thermique reçu par une particule qui s'évapore diminue, puisqu'une partie du flux est convertie en enthalpie d'évaporation et que l'autre partie sert à chauffer les vapeurs et à les élever de la température de la surface de la particule à la température du gaz.

• L'évaporation des particules modifie le mélange gazeux et donc ses propriétés thermodynamiques et de transport dans la couche limite et dans le jet.

Le coefficient de transfert de chaleur h est classiquement calculé à l'aide de la corrélation de Ranz et Marshall [43] obtenue pour des gouttes liquides en mouvement de translation :

2 0,6.Re1/ 2 Pr1/ 3 p Nu = Cependant, le transfert de chaleur plasma-particule est affecté par plusieurs autres phénomènes tel que :

• le gradient de température dans la couche limite ;

• l'évaporation qui diminue le transfert de chaleur vers la particule par la formation d'un nuage de vapeur autour de la particule qui a un effet tampon ;

• L'effet Knudsen : il n'est plus négligeable dès que le diamètre des particules est inférieur à 30 μm alors que le libre parcours moyen des atomes dans le plasma est de quelques microns Plusieurs corrections, introduisant des facteurs correctifs du nombre de Nusselt, ont été proposées pour tenir compte de l'ensemble de ces effets et le nombre de Nusselt est souvent écrit sous la forme suivante :

$$N_u = (2 + 0{,}6.R_P^{1/2}.Pr^{1/3}).F_{grand}.F_{Kn}.F_{vap} \qquad (I\text{-}2)$$

Où $F_{grad.}$ F_{Kn} et F_{vap} sont les facteurs correctifs dus respectivement au gradient de température dans la couche limite, à l'effet Knudsen et à l'évaporation. Nous présentons cidessous les principales corrections proposées dans la littérature.

corrélation de Lewis et Gauvin[44] pour un plasma d'argon :

$$N_u=(2+0\ ,515.Re^{0,5})(\frac{U_f}{U_\infty})$$

corrélation de Fiszdon[45] :

$$N_u=(2+0{,}6.R_p^{\frac{1}{2}}.Pr^{1/3}).(\frac{\rho_\infty}{\rho_p}.\frac{\mu_\infty}{\mu_p})^{0,6}(.\frac{C_{p\infty}}{C_{P_P}})^{0,38}$$

corrélation de Chen[47] :

$$N_u=2\qquad.(1+0{,}63R_{e_\infty}.Pr_\infty^{0,8})(\frac{Pr_s}{Pr_\infty})^{0,42})(\frac{\rho_\infty}{\rho_p}\frac{\mu_\infty}{\mu_p})^{0,5}.C^2)$$

corrélation de Bourdin [48] et Vardelle [49] avec propriétés intégrées dans la couche limite.

I.2.7.4-Transfert de quantité de mouvement :

Les forces qui s'exercent sur les particules dans le jet plasma et qui régissent leurs trajectoires sont principalement[39 40 50] :

- la force de traînée : c'est la force la plus importante, elle peut être modifiée par l'évaporation de la particule et des effets de non continuité de la couche limite. Elle est donnée par :

$$F_d = -\frac{1}{2}C_d\pi\frac{{d_p}^2}{4}\rho_\infty|V_\infty - V_p|.(V_\infty - V_p) \qquad (I.3)$$

La force de masse ajoutée : elle traduit l'accélération du fluide environnant due à l'accélération de la particule. Elle est exercée par le volume du fluide déplacé par la particule :

$$F_{ma} = -\frac{\pi}{6}{d_p}^2.\rho_\infty.\frac{dV_\infty}{dt} \qquad (I.4)$$

- la force liée à la rotation de la particule, résultat d'un gradient de vitesse de mouvement relatif jet plasma-particule :

$$F_r = -\frac{d_{p.\pi}^3}{8}.\rho_\infty.\omega_P(V_\infty - V_P) \qquad (I.5)$$

Le terme d'histoire de Basset : lié à l'état transitoire du gaz (effet de sillage) qui entoure la particule :

$$F_B = -\frac{3}{2}\,\rho_\infty . d_p^2 \sqrt{\pi u_\infty} \int_{-\infty}^{t} \left(\frac{dv_\infty}{d\tau} - \frac{dv_{p(\tau)}}{d\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{1-\tau}} \qquad (I.7)$$

Selon Lee et Pfender [19] pour un plasma :

$$F_b = -\frac{K_b}{4}\sqrt{\pi} \int_0^t d_p^0 \,.\, \rho_\infty \sqrt{U_\infty} \left(\frac{dV_\infty}{d\tau} - \frac{dV_p(\tau)}{d\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{1-\tau}} \qquad (I.8)$$

KB est une constante fonction de l'accélération relative plasma-particule, généralement KB = 6. Le terme d'histoire de Basset intervient lorsque l'état de la couche limite autour de la particule varie très rapidement et ne peut plus être considéré en équilibre quasi statique[44 51].

- La force de thermophorèse : liée au gradient de température dans la couche limite qui y induit des gradients de concentration.

$$\mathbf{F_{th}} = \frac{12\pi.\mu_\infty . U_\infty . \frac{d_P}{2} . \frac{C_S}{T_\infty}}{\left(1+6C_m\frac{\lambda}{d_p}\right)\left(1+2\frac{K_\infty}{K_p}+4C_t.\frac{\lambda}{d_p}\right)} \qquad (I.9)$$

Où λ est le libre parcours moyen des molécules de fluide, Ct est la distance de saut pour les conditions limites de vitesse, Cs est le coefficient de glissement thermique. D'après Brock et Talbot:[52 53]

Cs=1,17, Ct=2,18, Cm=1.14

La force de gravité :

$$F_g = -\frac{\pi d_p^3}{6}(\rho_p - \rho_g).g$$

La Figure I-20 illustre l'évolution du rapport des différentes forces relativement à celle de traînée, en fonction du diamètre d'une particule de zircone dans un plasma Ar-H2 25% vol. à 5000 K avec une vitesse relative plasma-particule de 500 m/s.

Il est à noter que la force de traîné est de loin la plus importante dans les conditions plasma, la force de Basset, qui est la force la plus importante après la force de traînée, ne dépasse pas plus de 10 % de cette dernière. Toutes les autres forces ont un module inférieur à 1 % de celui de la force de traînée.

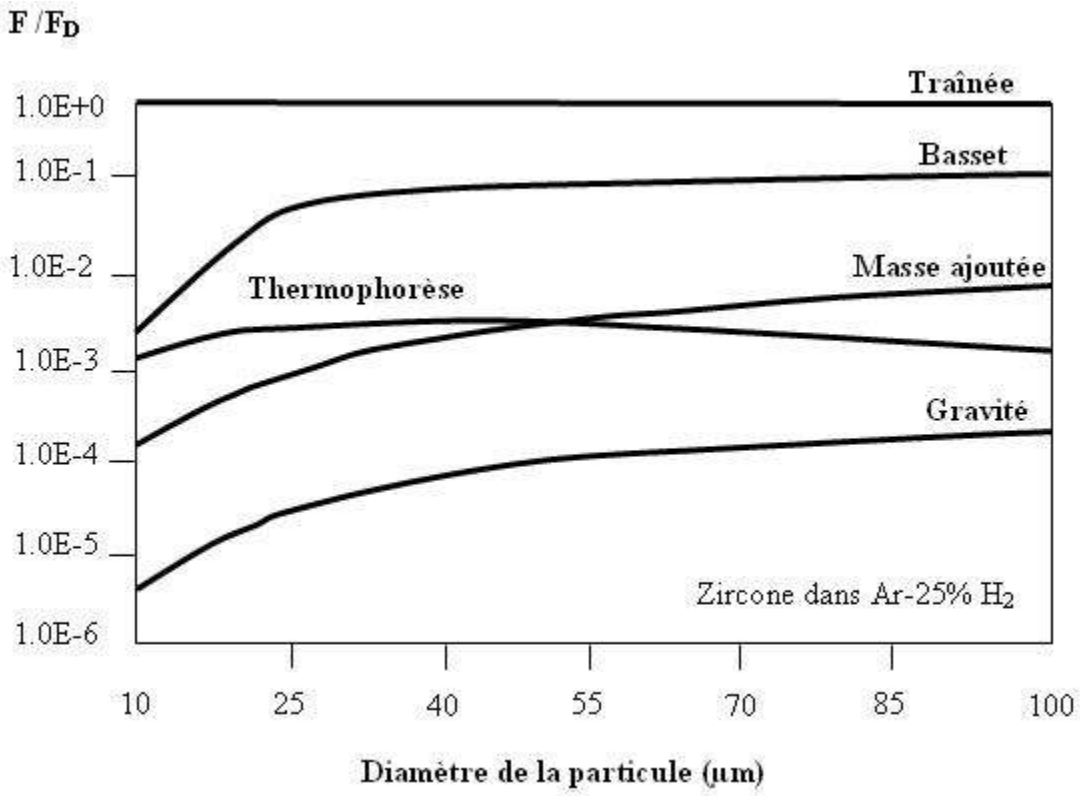


Figure I-20 : Rapport des différentes forces à la forces de trainé en fonction du diamètre d'une particule de zircone dans un plasma Ar-25%H2 de température 5000 K et pour[29] une vitesse relative plasma particule de 500 m/s.

La spécificité du traitement d'une particule dans un plasma tient en grande partie aux variations très importantes de température et donc de propriétés du gaz dans la couche limite thermique qui se développe autour de celle-ci. Elle est prise en compte par un facteur de correction apporté au coefficient CD. Dans la littérature se trouve en particulier :

La corrélation de Lewis et Gauvin [44], pour un plasma d'argon :

$$C_D = C_{DF}.\left(\frac{V_f}{V_\infty}\right)^{0,15}$$

La corrélation de Lee[46] :

$$C_D = C_{DF}.\left(\frac{\mu_\infty \rho_\infty}{\mu_s \rho_s}\right)^{0,15}$$

Vardelle et al. [48] utilisent les propriétés du gaz intégrées entre la température de surface de la particule (Ts) et la température du plasma au delà de la couche limite thermique entourant la particule

(T∞) :

$$\overline{\varphi} = \frac{1}{T_\infty - T_S}\int_{T_s}^{T_\infty} \varphi(T).\,dT$$

I.2.7.5 Effet des fluctuations du jet plasma sur le traitement des particules :

La Figure I-21 illustre l'ordre des grandeurs des temps caractéristiques des phénomènes d'instabilités impliqués dans le procédé de projection plasma[54 55]. Les fluctuations du pied d'arc représentent la seule instabilité ayant un temps caractéristique, de 0,05 à 0,5 ms, inférieur au temps de séjour des particules dans le jet, de l'ordre de la milliseconde. Ceci signifie que, suivant les cas, une particule verra entre une et une douzaine de bouffées chaudes de plasma.

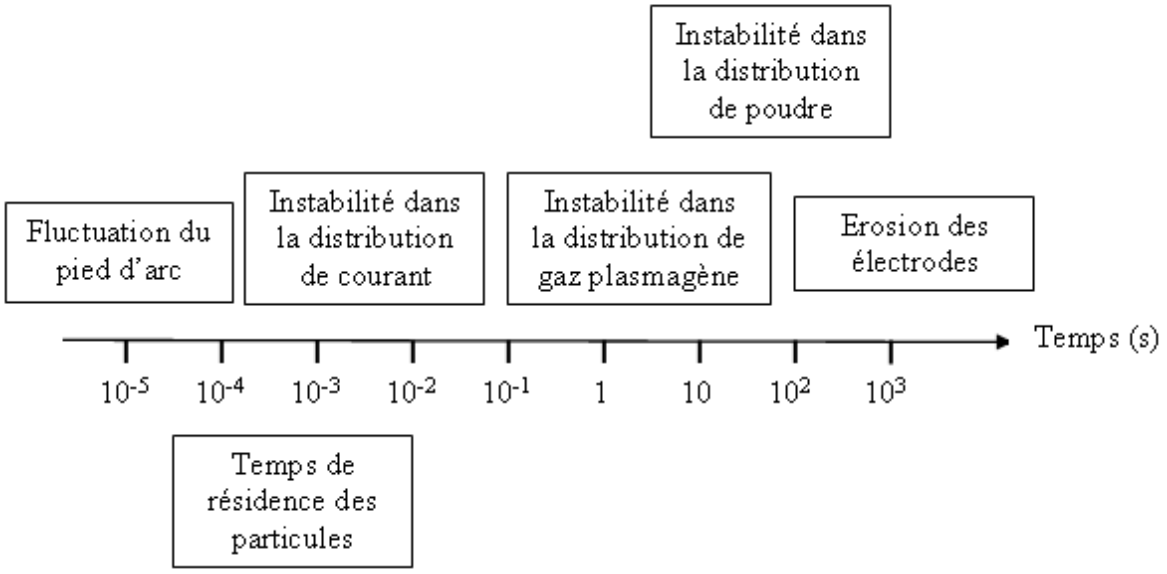


Figure I-21: Les échelles de temps des phénomènes physiques en projection plasma.

Divers travaux expérimentaux et numériques ont porté sur l'influence des fluctuations du jet plasma sur le traitement dynamique et thermique des particules.[55 56 57 58]
La Figure I-22 montre des photographies d'un jet de particules de molybdène dans un jet plasma d'Ar-H2 fortement fluctuant ($\Delta V/V = 0,6$). Elle illustre l'interaction entre le jet de plasma et le jet des particules au point d'injection. La quantité de mouvement du jet plasma fluctue continuellement (± 30 %) tandis que celle des

particules peuvent traverser le jet ou ne pas y pénétrer. Les fluctuations du jet, engendrées par le mouvement du pied d'arc, imposent des déviations plus au moins importantes au jet de particules, ces dernières suivent alors des trajectoires différentes et subissent ainsi des traitements différents et les histoires thermique et dynamique d'une particule dépendent de son temps d'injection.

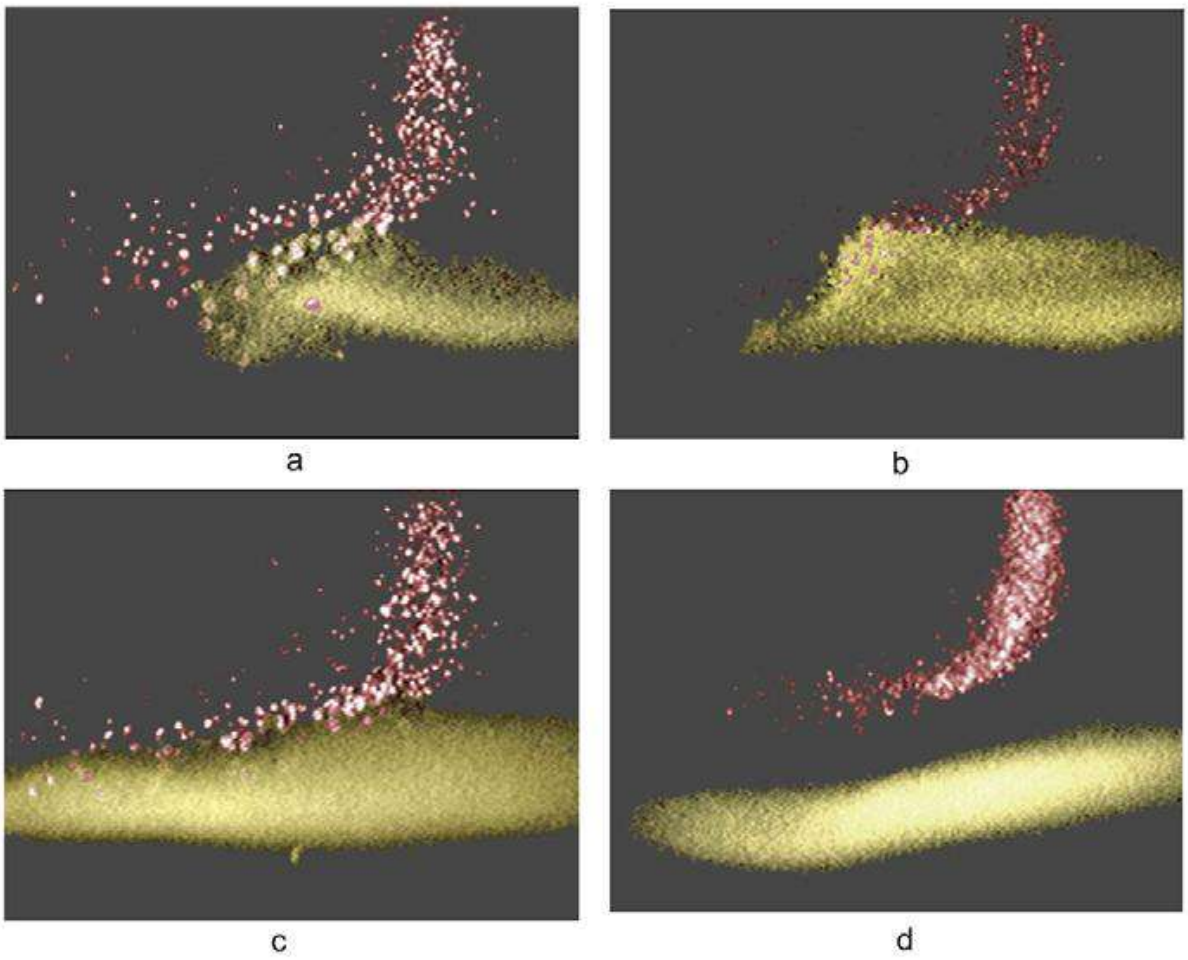


Figure I-22: Photographie de particules de molybdène injectées dans un jet plasma prise avec « Control Vision set-up » - déviation du flash laser de 5 μs .

I.2.8-Impact et formation du dépôt :

En projection plasma, les dépôts sont formés de couches successives de lamelles écrasées qui se chevauchent[59 60] .Les conditions opératoires déterminent la microstructure et les propriétés du dépôt formé dont la cohésion et la tenue sont assurées par les contacts inter-lamellaires et lamelle-substrat.

Plusieurs travaux expérimentaux[61 62 63] et de modélisation[64 65 66 67] ont été dédiés à une meilleure compréhension des phénomènes d'impact et de solidification d'une particule fondue totalement ou partiellement sur une surface. Ces études montrent que le phénomène d'étalement est contrôlé par les paramètres de la particule (état de fusion, température, vitesse, oxydation, …) et les paramètres substrat (température, rugosité, état d'oxydation …). Lorsqu'une particule fondue entre en contact avec le substrat, son énergie cinétique est dissipée sous l'effet des forces de viscosité et de tension de surface, elle forme alors une

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

Les travaux de **Madejski** [68]sont cités dans presque tous les articles traitant de ce problème. Le premier, il a étudié le degré d'aplatissement et l'étalement de la gouttelette sur une surface, en se fondant sur un bilan d'énergie et en tenant compte des effets de la solidification, les équations finales ayant été résolues numériquement.
Toutefois, il a supposé que la vitesse de solidification était suffisamment faible par rapport à la vitesse d'impact pour découpler les deux phénomènes.

Les travaux de **Kudinov**[**69**] et al. aboutissent à un classement qualitatif d'une trentaine de morphologies différentes de particules d'alumine étalées en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact sur une surface lisse (Figure I-23).
Une gouttelette totalement fondue s'étalerait correctement avec une vitesse faible (cas 1) et éclaterait au moment de l'impact sous l'action des forces de surface avec une vitesse élevée(cas 6). Ce phénomène étant appelé éclaboussure à l'étalement ou suivant l'appellation anglosaxonne utilisée par la suite « flattening splashing ». Dans le cas d'une particule partiellement fondue, le noyau solide resterait piégé au centre de la lamelle (cas 30) ou serait éjecté conduisant à une lamelle de forme annulaire (cas 17). Cependant, les paramètres du substrat n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

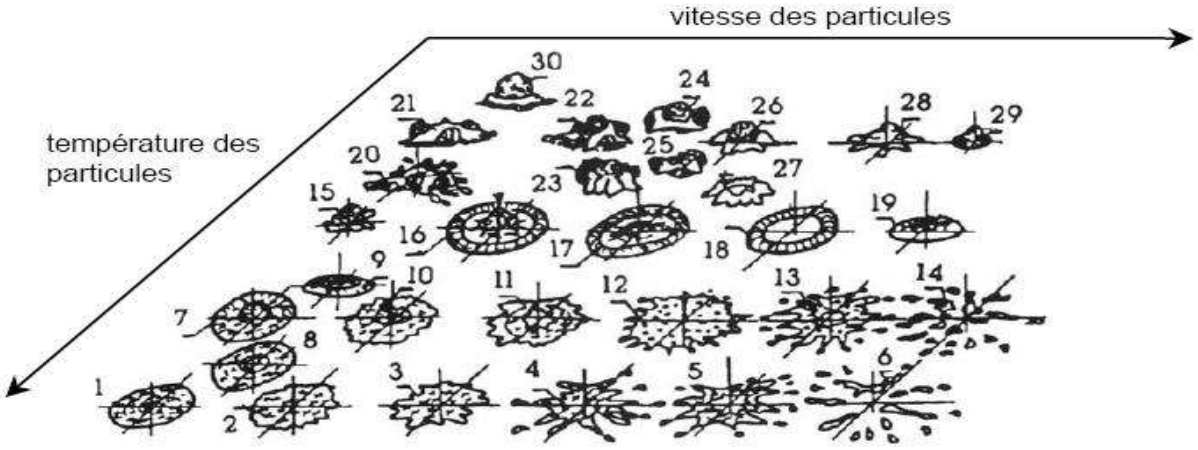


Figure I-23: Influence de vitesse et température des particules d'alumine projetées par plasma avant impact sur la morphologie des lamelles [69].

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

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

Où Re est le nombre de Reynolds de la particule,

$Re = \frac{\rho_p d_p v_p^2}{\sigma_p}$

σ_p étant la tension de surface liquide vapeur (J.m-2)

Escure et al. ont étudié l'impact des particules fondues d'alumine sur des substrats pour différentes températures et rugosités. Ils montrent que l'étalement est moins bon sur une surface froide que sur une surface chaude et qu'une rugosité importante peut favoriser le flattening splashing. Cependant, quelle que soit la température de la cible, le phénomène de splashing à l'impact est observé systématiquement pour des valeurs du nombre de Sommerfeld supérieures à une valeur critique $30 < Kc < 60$. Ce qui est à comparer aux impacts de gouttelettes d'eau pour lesquels la valeur critique est Kc =58.

Cedelle[71] a utilisé deux dispositifs expérimentaux différents pour étudier le comportement à l'impact d'une particule projetée par plasma. Le premier permet la génération d'une goutte millimétrique calibrée par plasma inductif et l'acquisition de la température de surface du substrat puis de la goutte lors de son impact. Le deuxième permet d'étudier l'impact d'une particule de quelques dizaines de micromètres projetée par plasma d'arc

. Il est constitué d'un pyromètre bichromatique et deux caméras rapides.

Il permet de visualiser des phénomènes d'étalement perpendiculairement et parallèlement au substrat à des échelles detemps de l'ordre de la microseconde et des échelles d'espace de l'ordre de la centaine de micromètres.

Il a été montré que le préchauffage d'un substrat au- delà d'une température appelé température de transition Tt engendrait la formation de pics d'oxydes à l'échelle nanométrique en surface de l'acier inoxydable 304L. Ceci est illustré par la microscopie à force atomique (AFM) de la Figure I-24, où les pics sont caractérisés par un coefficient de dissymétrie (« Skewness ») positif. Ces pics augmentent considérablement le nombre de points de contact entre chaque lamelle et le substrat. Ce qui a pour effet d'accroître la mouillabilité du substrat lorsque la température de ce dernier est supérieure à Tt et d'éliminer

les adsorbats et les condensats en surface. La résistance thermique entre lamelle et substrat est alors diminuée de plus d'un ordre de grandeur. Ce qui favorise la formation de lamelles circulaires sur substrat lisse, contrairement au cas où le substrat est maintenu à température ambiante ce qui entraîne la formation de lamelles déchiquetées. De même, les vitesses de trempe de lamelles millimétriques de nickel produites par l'impact de gouttes millimétriques ont été mesurées en fonction de la température de préchauffage du substrat. Les lamelles déchiquetées, étalées sur substrat froid (température ambiante) présentent des vitesses de refroidissement relativement faibles (de l'ordre de 104 K/s). Sur un substrat chaud (température supérieure à Tt), les lamelles circulaires, de forme régulière ont, quant à elles, des vitesses de refroidissement beaucoup plus élevées (5.104 à 7,5.104K.s-1). Le contact thermique est donc aussi amélioré lorsque Tt > T.

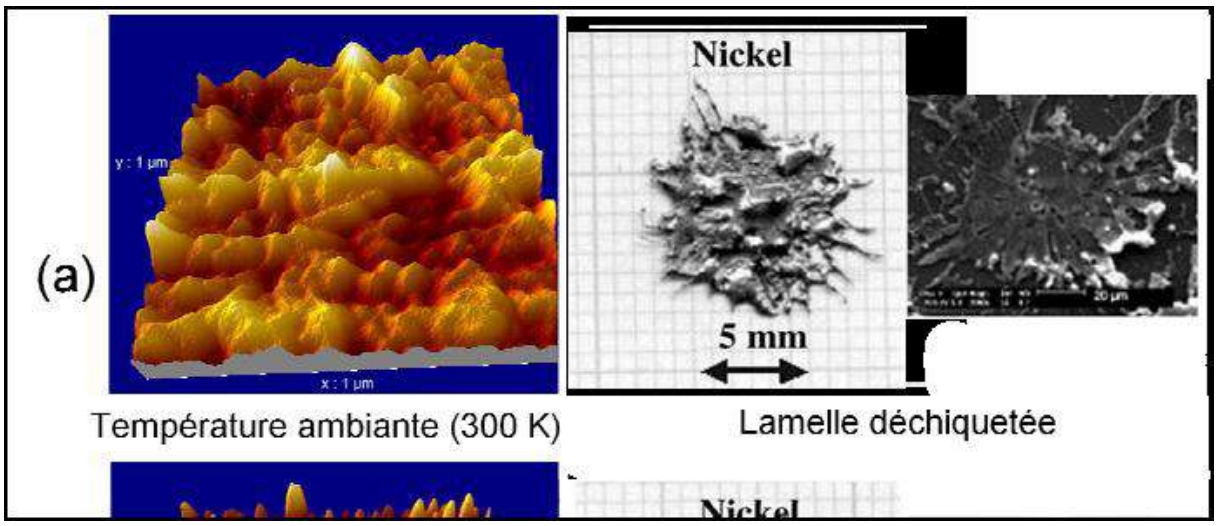


Figure I-24 : Morphologies de lamelles obtenues sur un substrat en acier [72].

I.3- 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.

II -Résolution numérique de l'impact de gouttes sur un substrat solide:

II.1-Introduction :

La physique qui s'articule autour du comportement d'écrasement d'une goutte sur un substrat liquide ou solide reste encore de nos jours mal maîtrisée, même si beaucoup d'études , expérimentales et numériques, ont permis d'améliorer la compréhension de l'écoulement de la particule liquide. La reproductibilité expérimentale des phénomènes est difficile à mettre en oeuvre, la prédiction de la structure du revêtement et de sa durée de vie est donc difficile à déduire de considérations expérimentales. C'est pourquoi l'outil numérique devient rapidement indispensable pour élargir l'horizon d'études sur ce domaine. La simulation numérique se doit alors de respecter les phénomènes entrant en jeu lors de l'impact d'une ou plusieurs gouttes, en s'assurant que les hypothèses de configuration initiale (taille, géométrie des gouttes par exemple) restent valides et soient comparables à des techniques expérimentales. Dans ce chapitre nous présentons successivement les équations de base du problème numérique puis les principales méthodes de résolution numériques utilisées pour résoudre ce type d'équation présentées dans la littérature.

II.2- Les équations du problème :

II.2.1- Méthodes numériques :

De nombreuses études ont été réalisées, en adoptant des techniques diverses, pour comprendre les phénomènes qui gouvernent l'impact de gouttes . Par application du principe fondamental de la dynamique, le bilan des forces au sein de chaque fluide newtonien exprime la vitesse en fonction des paramètres du système :

$$\nabla . u = 0 \qquad \text{(II. 1 . a)} \quad .$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(uu)\right) = -\nabla p + \rho g + \nabla(\mu[\nabla u + \nabla^t u]) + F_{TS} + B_r \qquad \text{(II. 1 . b)}$$

Où ρ et μ, sont respectivement la masse volumique et la viscosité de la phase concernée.

A cette équation " de base " sont ajoutés différents termes pour prendre en compte les divers aspects de ce genre de problème. Le terme **Br** sera explicité ultérieurement. Le terme $\mathbf{F_{TS}}$, quant à lui est lié à la notion d'interface de deux fluides non miscibles. Afin de prendre en

compte le caractère diphasique fluide- air de l'impact de goutte, l'interface des phases immiscibles est modélisée par une équation définie grâce à la conservation des flux de matière, donc de la masse. Soit V la vitesse locale de l'interface de normale ni et ρ1u1 et $\rho_2 u_2$les quantités de mouvement associées aux fluides 1 et 2. Par conservation de la masse:

$$\rho_{1(u_1 n_t - V)} = \rho_{2(u_2 n_t - V)} \qquad \text{(II. 2)}$$

Cette équation permet de traduire la continuité du champ de vitesse normal à l'interface mais ne prend pas en compte la présence de la tension superficielle dans cette zone.
A l'équation II.2 est donc ajouté un terme qui correspond à la force issue de la tension superficielle, soit :

$$F_{TS} = \sigma k n_i \qquad \text{(II.3)}$$

Où σ, κ et δ sont respectivement le coefficient de tension superficielle, la courbure moyenne locale de l'interface et la fonction Dirac puisque l'interface est considérée comme un saut de propriétés physiques. Ces équations sont valables dans chaque phase fluide prise séparément. Afin de déterminer le champ de vitesse dans tout le domaine, il est nécessaire de résoudre une équation supplémentaire qui prend en compte la présence de l'un ou l'autre des fluides en chaque zone du domaine.

II.2.2. Modèle à un fluide :

Ce type de modèle a été utilisé par plusieurs auteurs pour simuler la déposition sur substrat sec ou l'impact sur film liquide. Il convient donc de définir une fonction qui détermine géométriquement la position des phases dans le domaine. Soient φ1 et φ2 les fonctions phase définies par :
φ1(x, y, z, t) = 1 dans les zones contenant le fluide 1
φ1(x, y, z, t) = 0 dans les zones ne contenant pas de fluide 1
φ2(x, y, z, t) = 1 dans les zones contenant le fluide 2
φ2(x, y, z, t) = 0 dans les zones ne contenant pas de fluide 2

Les fluides étant immiscibles, il vient tout naturellement que :

φ2(x, y, z, t) = 1- φ1(x, y, z, t).

Par continuité des vitesses à l'interface, la vitesse locale de l'interface V vérifie :

$$v = u_1 n_1 + u_2 n_1 \qquad \text{(II.4)}$$

Les fonctions phase φ1 et φ2 se déplacent en fonction de la vitesse de l'interface V. Cette évolution peut être décrite par une équation cinématique qui relie les fonctions à V :
Cette équation d'advection définit le transport de chaque phase dans le domaine, en particulier à l'interface où intervient le saut de phase de 1 à 0. Au lieu d'utiliser deux fonctions de phase

φ1 et φ2, il est plus intéressant d'introduire une fraction volumique qui répond aux mêmes lois et définie sur tout le domaine.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V\nabla C = 0 \qquad \text{(II.5)}$$

Cette fraction volumique appelée fonction couleur et notée C prend pour valeur 1 dans le fluide qui compose la goutte et 0 dans l'air. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide a une valeur de un et une maille vide 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.

Les caractéristiques physiques des milieux s'expriment en fonction de la présence de chaque fluide :

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)C \qquad \text{(II.6-a)}$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)C \qquad \text{(II.6-b)}$$

A l'aide de ce modèle et de la définition de la fonction couleur, la tension superficielle peut être exprimée seulement en fonction de C.

II.2.3- Modélisation de la tension de surface :

La tension superficielle est une force qui agit sous la déformation de l'interface. Elle est donc proportionnelle à la courbure de l'interface :

$$F_{TS}(M) = \sigma K(M) n_j(M) \qquad \text{(II.7)}$$

La géométrie de l'interface n'est pas une donnée du problème. Le fait d'exprimer le problème par un modèle à un fluide permet de s'affranchir de cette donnée.
Il est donc nécessaire de pouvoir exprimer la courbure κ grâce aux autres variables afin de déterminer la tension superficielle.
Une méthode consiste à sommer les forces de tension tangentielles à l'interface sur le contour ds d'un volume élémentaire, puis à exprimer la tension superficielle comme intégrale curviligne sur **ds** des termes σ (M) où t est une force de surface tangentielle à l'interface et M Є ds. A l'aide de cette définition, la courbure moyenne k est égale à l'opposé de la divergence de la normale à l'interface. On obtient donc :

$$F_{TS}(M) = -\sigma(\nabla . n_i)(M) n_i \qquad \text{(II.8)}$$

De plus, la normale à l'interface est également fonction de la fonction couleur C :

$$n_i = \frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \qquad \text{(II.9)}$$

Finalement, le terme de tension superficielle s'exprime seulement en fonction du coefficient de tension et de la fonction couleur C :

$$F_{TS} = \sigma \nabla \left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right) . \frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \qquad \text{(II.10)}$$

Au final, le système d'équations à résoudre est le suivant :

$$\nabla u = 0 \qquad \text{(II.11-a)}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \nabla C = 0 \qquad \text{(II.11-b)}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla(\mu[\nabla u + \nabla^t u]) - \sigma \nabla \left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right) \frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} \qquad \text{(II.11-c)}$$

Ce système permet de résoudre les inconnues (u, ρ, C) par une expression volumique des équations de mouvement en incompressible avec prise en compte des forces interfaciales sans la détermination explicite de la géométrie de la courbure de l'interface.
A la notion de la tension superficielle s'ajoute celle de l'angle de contact. Cet aspect est difficile à analyser, tant d'un point de vue expérimental que numérique. La prise en compte de l'angle de contact reste encore très peu utilisée car difficile à mettre e1n oeuvre numériquement, mais des considérations théoriques montrent que sous certaines gammes de nombres de Reynolds et de Weber, l'angle de contact a peu d'influence [1].

II.2.4- Modélisation du substrat :

Dans les paragraphes précédents, les équations de Navier-Stokes et d'advection permettent de résoudre l'écoulement de chacune des phases fluides du domaine. Mais le substrat quant à lui, bien que solide et sans vitesse, ne doit pas être traité différemment. C'est pourquoi un terme supplémentaire est ajouté à l'équation de mouvement pour prendre en compte le caractère fixe du substrat, tout en considérant cet élément comme un fluide :

$$\mathrm{Br} = -\frac{\mu}{k}(u - u_0)$$

Ou : μ est la viscosité, k st la perméabilité milieu, u0 est une vitesse de référence.
L'équation de mouvement s'écrit dans tout le domaine d'étude :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla(\mu[\nabla u + \nabla^t u]) - \sigma\nabla\left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right)\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|} - \frac{\mu}{k}(u - u_0) \qquad \text{(II.12)}$$

Dans le cas le plus général, ce système d'équation ne fait intervenir de solution analytique. L'outil numérique devient alors indispensable pour fournir des résultats approchés mais précis sur un domaine discrétisé à la fois en temps et en espace.

Ce type d'étude sur ces modèles numériques conduit généralement à la détermination du $\xi = D/d$ qui représente le degré d'étalement de la goutte et qui est défini comme le rapport du diamètre de la lamelle étalée D, supposée cylindrique ou sphérique, au diamètre de la particule avant l'impact d, et aussi à l'évolution de la morphologie des lamelles lors de l'impact et l'influence des paramètres des particules à l'impact (vitesse d'impact, température

des particules, viscosité) sur la taille des lamelles formées et sur leurs modes d'étalement et de solidification.

II.3- Méthodes numérique de l'équation d'advection :

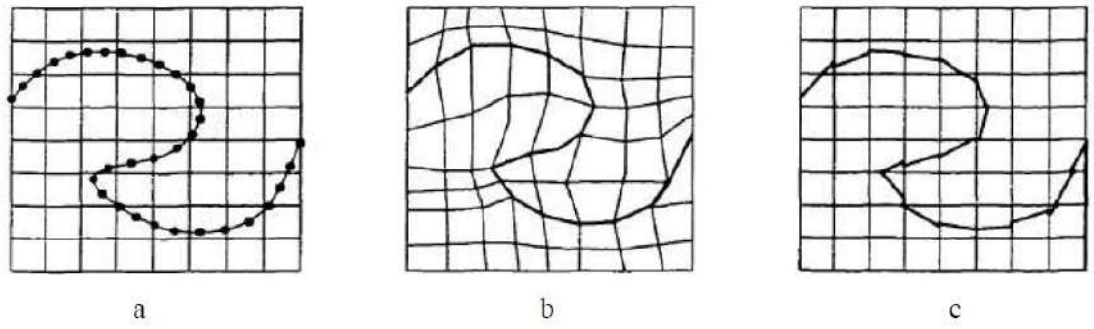


Figure II.1: Les méthodes de représentation des interfaces [2].
(a) la méthode des marqueurs, (b) la méthode du maillage adaptatif, (c) la méthode VOF.

II existe différentes approches pour résoudre les écoulements à interface sur maillage fixe. La première est appelée la méthode des marqueurs (MAC ou Marker and Cell). Elle consiste à" semer " des marqueurs sur l'interface à l'instant initial. La résolution des équations de Navier-Stokes et le mouvement des marqueurs permet de déterminer l'évolution de l'interface. Une interpolation entre les marqueurs permet de reconstruire l'interface [3]. Un autre schéma de résolution de l'équation d'advection est nommé VOF (Volume Of Fluid) et s'effectue en trois étapes. En utilisant cette méthode VOF, en fonction de la distribution de la fonction couleur C, l'interface est reconstruite comme discontinuité de cette fonction. Ensuite, les équations de Navier- Stokes fournissent le champ de vitesse, puis grâce au champ de vitesse, la nouvelle distribution de la fonction couleur C est calculée par l'équation d'advection. Cette méthode offre de meilleures possibilités en vue d'ajouter au système les équations de la thermique qui vont se baser sur la description de l'interface. Un autre avantage de cette méthode est qu'elles est plus économique que la méthode utilisant les marqueurs car une seule valeur (la fraction volumique) doit être associée à une maille de calcul et que le champ de fraction volumique permet, par une étape de reconstruction géométrique de l'interface, de déterminer la position exacte de la surface libre. C'est cette étape de reconstruction qui fait la

spécificité de la méthode VOF. Lors de l'étape d'advection, l'interface reconstruite est transportée en utilisant la vitesse du fluide et on évalue alors les flux volumiques qui passent entre les différentes cellules du domaine de calcul, ce qui permet de construire le nouveau champ de fraction volumique.

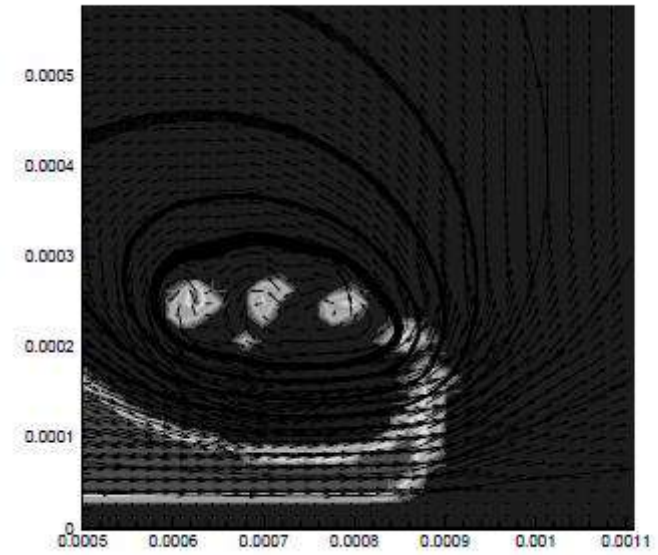


Figure II.2 : Morcellement de goutte par schéma VOF**.**

II.4- L'équation de l'énergie :

II.4.1- Les techniques existantes :

II existe diverses méthodes pour déterminer le champ thermique d'un milieu avec prise en compte de la solidification. Certains auteurs définissent le milieu qui change de phase comme deux domaines séparés par une interface qui correspond au front de solidification. Le champ thermique de chacun des milieux est résolu séparément et de manière explicite, et l'interface correspond à une condition limite interne au système [4]. La difficulté de cette méthodologie repose sur la nécessité de déterminer la position du front de solidification, ce qui s'effectue souvent par la méthode de Landau sur un maillage évolutif, de plus, elle s'adapte mal aux cas2D et 3D.

Une deuxième méthode, implicite en temps, est appelée méthode du

Cp apparent. Dans l'équation de l'énergie, le terme source Se correspond au changement de phase liquide / solide. Il s'exprime usuellement comme fonction de la fraction solide f, et du temps :

$$Sc=\rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \qquad \text{(II.13)}$$

où $L_f$est la chaleur latente de fusion Cette méthode est efficace dans les cas où la solidification s'effectue à vitesse modérée, mais elle devient inefficace lorsque la solidification est trop rapide.

Un autre type de méthode est celui à terme source, à l'équation de l'énergie, on ajoute un terme qui prend en compte l'absorption ou le dégagement de chaleur par changement de phase.

Cette technique s'adapte bien aux maillages fixes et fournit une bonne précision. La résolution, basée sur la méthode " New Source " repose sur un algorithme itératif de type point fixe sur la température où le noeud qui change de phase est ramené et maintenu à la température de changement de phase grâce au terme source. Ce calcul est réitéré jusqu'à la convergence de la température avec un terme source égal à la chaleur latente. Cette procédure permet de découpler les champs de température et de fraction solide calculés au même instant.

II.5- Solidification :

La résolution des équations de conservation de l'énergie à l'intérieur du domaine de calcul permet de déterminer la proportion de phase solide dans chaque maille. Pour déterminer le front de solidification, a chaque pas de temps, on définit un nouveau paramétré, la fraction de volume fluide, telle que $\emptyset = 1$ pour une maille remplie de liquide et $\emptyset = 0$ si la cellule contient seulement du solide, et $0 < \Theta < 1$ si les mailles se trouvent sur le front de solidification A partir des valeurs de Θ, la surface de la phase solide est déterminée de la même manière que la surface libre de la goutte (à partir de C).

II.6- Méthodes numériques de résolution :

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

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

• de représenter l'interface dans l'espace,

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

Le choix d'une méthode numérique dépend étroitement du type de problème considéré.
Les méthodes les plus employées pour simuler les écoulements diphasiques en présence d'interfaces recourent à une discrétisation des équations du mouvement sur un maillage [5].
Il existe deux types de méthodologies différentes pour résoudre les problèmes diphasiques.
La première, dite approche 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 de déterminer le mouvement de ce milieu sans prendre en compte l'autre fluide. Cela nécessite un maillage adaptatif qui suit les déformations de l'interface. L'intérêt de ce type de méthode est de fournir avec précision l'évolution de la surface libre en fonction du temps et grâce à un maillage évolutif, de raffiner localement pour améliorer la précision des phénomènes liés à l'interface. Les inconvénients de cette méthodologie résident dans le coût et le temps de calcul nécessaires à la reconstruction de l'interface et des conditions limites du système à chaque pas de temps. Le coût est d'autant plus fort que les déformations sont intenses [6]. 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. Cette méthode est intéressante lors de la déposition de gouttes sur le substrat [7] puisqu'elle autorise la prise en compte de l'angle de contact comme condition limite. En se basant sur des angles déterminés par voie expérimentale, les auteurs ont pu retrouver un comportement proche des phénomènes physiques. En appliquant cette technique sur un maillage non structuré, ils ont pu simuler la dynamique et la thermique de l'impact d'une goutte sur le substrat en tenant compte d'une résistance thermique de contact sur une épaisseur finie entre les deux matériaux. Cette technique suppose de plus connue la condition limite de la surface libre de la goutte souvent prise comme adiabatique [8]. L'autre

méthodologie est dite 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 coûteuse que la précédente [9]. De plus, les phénomènes de rupture d'interface ne posent pas de problèmes de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, la seconde s'écrasant sur le splat stabilisé formé par la première. Cependant, de par sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation d'advection au travers de une variable
C. Comme toute équation, celle-ci ne peut donc qu'approcher la position de l'interface. Le code de calcul ANSYS permet de résoudre les équations précédentes avec un modèle à un fluide où les équations de Navier-Stokes et de l'énergie sont découplées. L'originalité repose sur la discrétisation, de type éléments finis, qui se distingue par la généralité de sa formulation, permettant la représentation des géométries les plus complexes, ainsi que l'imposition la plus naturelle des conditions aux limites. Par défaut, le code possède des conditions limites de type Neumann généralement utilisés dans les simulations de l'impact de gouttes.

II.7- Présentation du code de calcul ANSYS :

ANSYS est un ensemble de programmes puissants, basé sur la méthode des éléments finis, pour la simulation des divers problèmes rencontrés en engineering, capable de résoudre un large éventail de problèmes allant des analyses linéaires les plus simples aux problèmes non linéaires les plus complexes. ANSYS contient une très riche bibliothèque d'éléments qui peut

virtuellement modéliser n'importe quelle géométrie. Il a aussi une large bibliothèque de lois de comportement allant des plus simples aux plus sophistiquées et qui peut simuler le comportement de pratiquement tous les matériaux typiques en engineering tels que le béton, l'acier, le caoutchouc, les polymères, les composites, et les céramiques. Conçu comme un programme général de simulation, ANSYS peut être utilisé non seulement pour l'étude des problèmes de structures mais aussi pour la simulation d'autres problèmes tels que le transfert

de chaleur, la diffusion de la masse, l'analyse thermale électrique couplée…. Parce qu'il comprend plusieurs composantes telles que : ANSYS/professionnel, ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Structural, ANSYS/LS-DYNA, ANSYS/Flotran,…etc .Chaque composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (types d'éléments, conditions aux limites, tracés,…etc). Dans notre étude, on a utilisé le module ANSYS/Multiphysics dans Flotran, qui permet de traiter la majorité des problèmes de dynamique des fluides et de transferts de chaleur. Il offre des outils très puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions, en utilisant un des éléments thermo-fluides : l'élément FLUID141, pour la simulation 2D, et l'élément FLUID142, pour la simulation 3D.

II.8- Procédure numérique :

Pour simuler la dynamique de l'impact et de l'étalement des particules par ce code de calcul, les équations de Navier Stokes ont été utilisées en adoptant la méthode des éléments finis avec une approche Lagrangienne. Avec cette méthode, on peut suivre la géométrie finale de la goutte et l'évolution thermique de la lamelle jusqu'à la solidification. Le mouvement du liquide est gouverné par l'équation de conservation de la quantité de mouvement couplée à l'équation de l'énergie. Ces lois sont souvent des équations différentielles qui font intervenir des composantes de la vitesse (u,v), des champs de température (T) et de pression (P).Un algorithme de volume de fluide (VOF), intégré dans le code de calcul ANSYS, est utilisé pour suivre la surface libre du fluide (la goutte durant son étalement).

Il est évident que ces équations sont non-stationnaires et non-linéaires. Il faut donc choisir une stratégie optimale de couplage des techniques itératives de résolution des systèmes non linéaires avec des techniques d'intégration dans le temps. Ce choix est crucial pour la bonne convergence et l'efficacité de l'algorithme numérique de résolution des problèmes d'impact en dynamique rapide.

Pour les calculs, la simulation repose sur les simplifications suivantes :

- l'impact d'une particule liquide sur un solide se fait dans une atmosphère inerte ;
- la forme de la goutte est sphérique à l'impact ;
- l'écoulement du fluide est considéré comme Newtonien et laminaire ;
- seule la composante de la pression normale à la surface du liquide est prise en compte, les autres composantes étant supposées négligeables ;

- Le contact entre la lamelle et le substrat est considéré comme parfait.

Les paramètres d'entrée de cet modèle sont : le diamètre initial de la goutte d, la vitesse d'impact v0, la densité massique ρ du liquide, sa viscosité μ, la température initiale de la goutte et du substrat.

II.9- Conditions aux limites

II.9.1-Conditions aux limites de l'écoulement

La surface libre de la goutte et l'interface entre la goutte et le substrat sont affectes d'une condition de "non-glissement" qui permet de modéliser une surface qui interagit normalement avec le fluide en opposant une surface a l'écoulement.

II.9.2-Conditions aux limites thermiques

Elles sont de trois types :

1. Condition adiabatique : elle concerne la surface libre de la Lamelle (l'interface liquide - gaz).
2. Température constante : elle concerne les frontières extérieures du domaine. Dans le substrat, les frontières extérieures du domaine sont suffisamment éloignées de la zone d'impact pour ne pas être thermiquement affectées.
3. Température initiale : cette condition est appliquée seulement a la surfa ce du substrat(surface d'impact). Ensuite, cette température évolue, au cours du temps au contact de lagoutte en fusion.

II.9.3-Découplage pression /vitesse

Dans les problèmes diphasiques, une des techniques fréquemment utilisée pour résoudre le couplage vitesse-pression est la méthode de projection. Dans cette méthode, on résout les équations de Navier-Stokes en prenant la pression au temps précédent comme référence, et en ajoutant la contrainte à divergence nulle du champ de vitesse. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée à l'impact de gouttes [10]. Une méthode mieux adaptée est celle du Lagrangien augmenté qui permet de découpler les champs de pression et de vitesse. Dans cette méthode itérative de type prédiction correction, on résout les équations de Navier-Stokes en ajoutant la contrainte d'incompressibilité (divergence nulle). Entre deux itérations temporelles, on résout L itérations de Lagrangien augmenté.

II.10- Stratégie de calcul

La stratégie de calcul peut être résumée comme suit :

- Création automatique du maillage (des noeuds et des connectivités des éléments),
- Lecture des paramètres physiques (viscosité, densité, conductivité, etc.), des sollicitations et des conditions aux limites,
- Construction des matrices et vecteurs élémentaires, puis assemblage de ceux-ci pour former le système global,
- Résolution du système des équations non linéaires, après prise en compte des conditions aux limites,
- Effectuer une étape Lagrangienne
- Solution

Enfin, Les simulations seront réalisés dans un domaine 2D cartésien pour mettre en place correctement les paramètres numériques de la simulation, pour localiser et analyser les zones singulière de l'écoulement des gouttes après leur écrasement sur le substrat solide et de s'assurer que l'impact est qualitativement bien restitué.

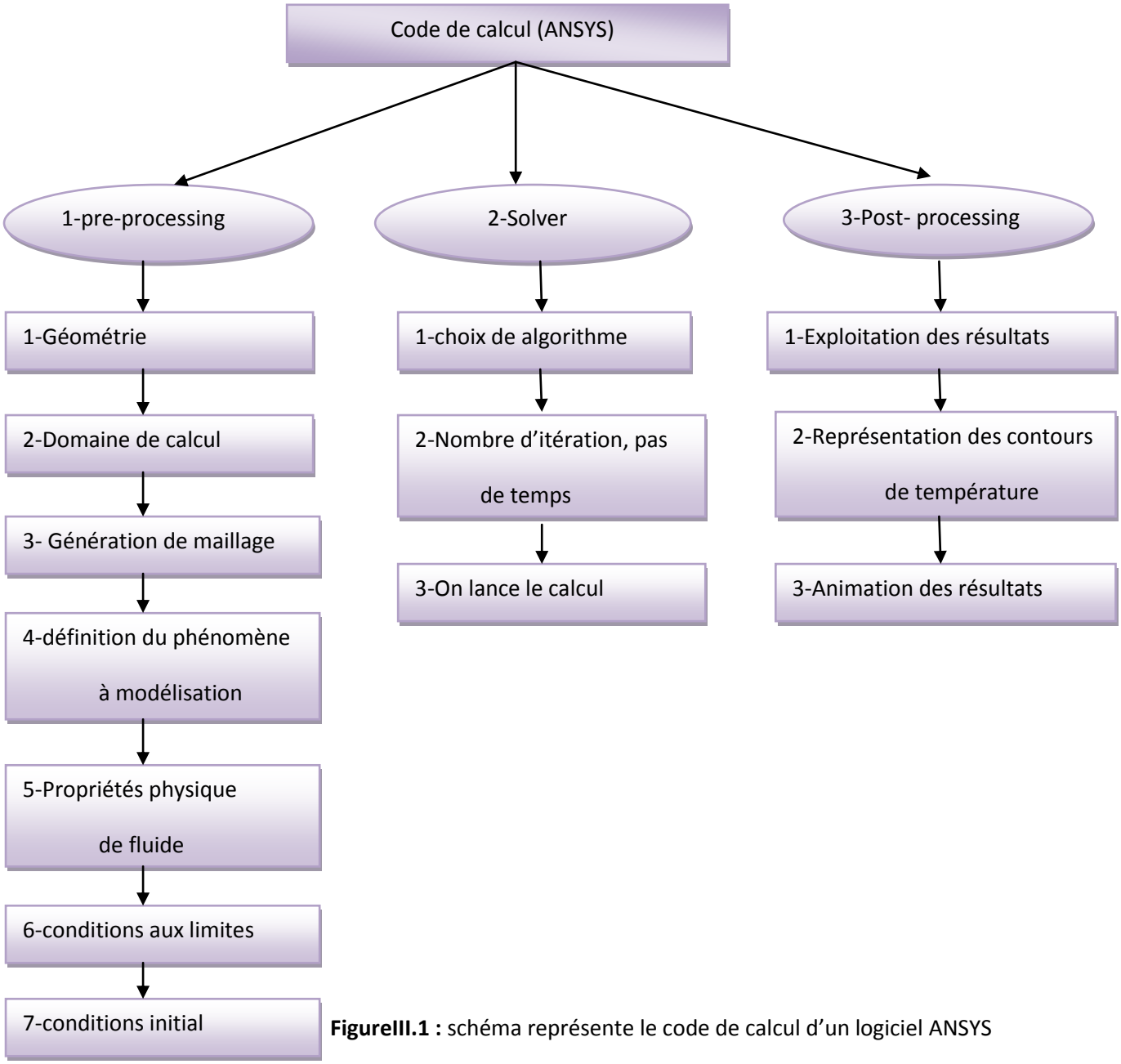
II.11- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit le modèle physique utilisé le plus souvent pour simuler l'impact d'une ou de plusieurs gouttes sur un substrat solide, puis la résolution numérique du système d'équations. L'étape suivante consiste à réaliser la simulation de l'impact d'une goutte puis de plusieurs gouttes, soit les unes à coté des autres, soit les unes au-dessus des autres pour aboutir à la compréhension des phénomènes intervenant lors de la déposition de gouttes dans le but de réaliser la simulation d'un revêtement céramique.

III.1-Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats des simulations numériques d'impact de gouttes sont présentés pour différentes configurations. Tout d'abord, on considère l'impact d'une goutte sur un substrat solide puis l'impact simultané de gouttes identiques afin d'observer les phénomènes de recouvrement du substrat et de rencontre des gouttes voisines en fonction de quelques conditions d'impact (distance entre deux gouttes, vitesse d'impact...). Enfin à cette configuration, on ajoute la présence de trains de gouttes dans le but de voir l'origine de la formation de la porosité dans les dépôts céramiques.

III.2-Schéma de logiciel ANSYS :



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

III.3-Résultats de simulations numériques :

L'impact de goutte est influencé par plusieurs paramètres, tel que la vitesse d'impact, la taille de la goutte, la nature du liquide et en particulier sa tension de surface et sa viscosité, la rugosité qui joue un rôle primordiale pour le phénomène d'éclatement (éclaboussure), et la résistance thermique de contact goutte /substrat .

III.4-Matériaux utiliser :

Dans cette étude numérique nous sommes intéressés à des particule d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetés une substrat métallique (acier d'outil) le choix de l'aluminium a été orienté par nombreuse étude déjà menées ,telle que les travaux expérimentaux de Minxia Xue , Yoav Heichal , sanjeev chandra et javad Mostaghimi(1.2) qui ont été consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'aluminium sur substrat en acier ; et qui sera l'objet d'identification de nos résultats .

III.4.1.L'aluminium :

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

- ✓ Une bonne tenue mécanique aux température élevées , et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de $1.09.10^{6}$j/kg .
- ✓ Une bonne résistivité électrique >1012 Ohm.m [2,3] .
- ✓ Une dureté HV sons une charge de 1N de 9.21 Gpa [2,3] .
- ✓ Une bonne résistance à l' usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10^{-5} mm^3 /Nm , à l'abrasion par une bille de sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à $3.10^{-3}mm^3$/Nm lorsque la température augmente à 400°C [2,3].
- ✓ Une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués , aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance a l'oxydation .

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

- ✓ Les application mécanique , l'aluminium est l'abrasif le plus répandu de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides . [2,3].
- ✓ Les application réfractaires , résistance aux hautes température ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre le corrosion a hautes température [2,3].

- ✓ Les application médicale ; le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie [2,3].
- ✓ Les application électrique et électronique : l'aluminium et utilisée dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation .
- ✓ Les application optique : les films d'aluminium permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires [2,3]

III.5- La morphologie d'une particule d'Alumine écrasée sur un substrat :

Dans cette première étude, on s'intéresse à la simulation de l'écrasement d'une particule d'Alumine fondue sur un substrat d'acier inoxydable. Les caractéristiques du problème sont données au tableau III.1.

Matériel	Particule : Alumine	Substrat: Acier	Unité
Densité	6980	7200	Kg/m^3
Viscosité (liquide)	0.0022	-	Pa.s
Conductivité thermique à20 /200/500°c	400/500/550	64	W/m.K
Chaleur spécifique	900	434	J/kg.K
Température initiale	519	298	°C
Dimension Ø	2.2	Epaisseur : 2.4	mm
Vitesse initiale	4	0	m/s

Tableau III.1. Paramètres physiques de l'Alumine.

III.6-Validation de l'impact de gouttes :

La figure (III.2) représente la configuration utilisée pour la simulation de l'impact de goutte sur substrat ; en prenant une goutte d'aluminium avec un diamètre de 2.2 mm et une température initiale de 519K ; et une vitesse d'impact de 4 m /s Sur un substrat en acier initialement à 298°C.

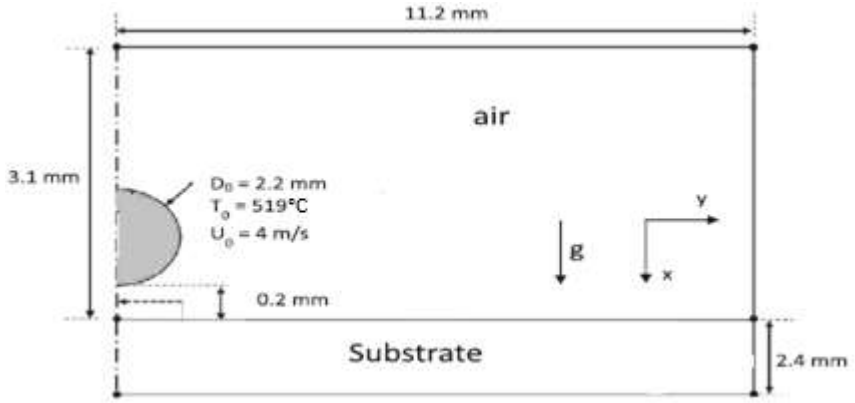


Figure III.2 : la configuration utilisée pour la simulation de l'impact de goutte sur substrat.

III.6.1Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus :

La figure (III.3) montre une comparaison entre nos résultats de simulation et celle obtenues par Arvind Kumar dans les mêmes conditions , d'où on constat un bon accord de la dynamique d'impact dans le temps.

La gouttelette se propage symétriquement par rapport au point d'impact cependant ; la forme convexe abaisse la pente dans le temps en glissant lentement sur substrat jusqu'à l'étalement totale dans un temps égale à 2.4 ms.

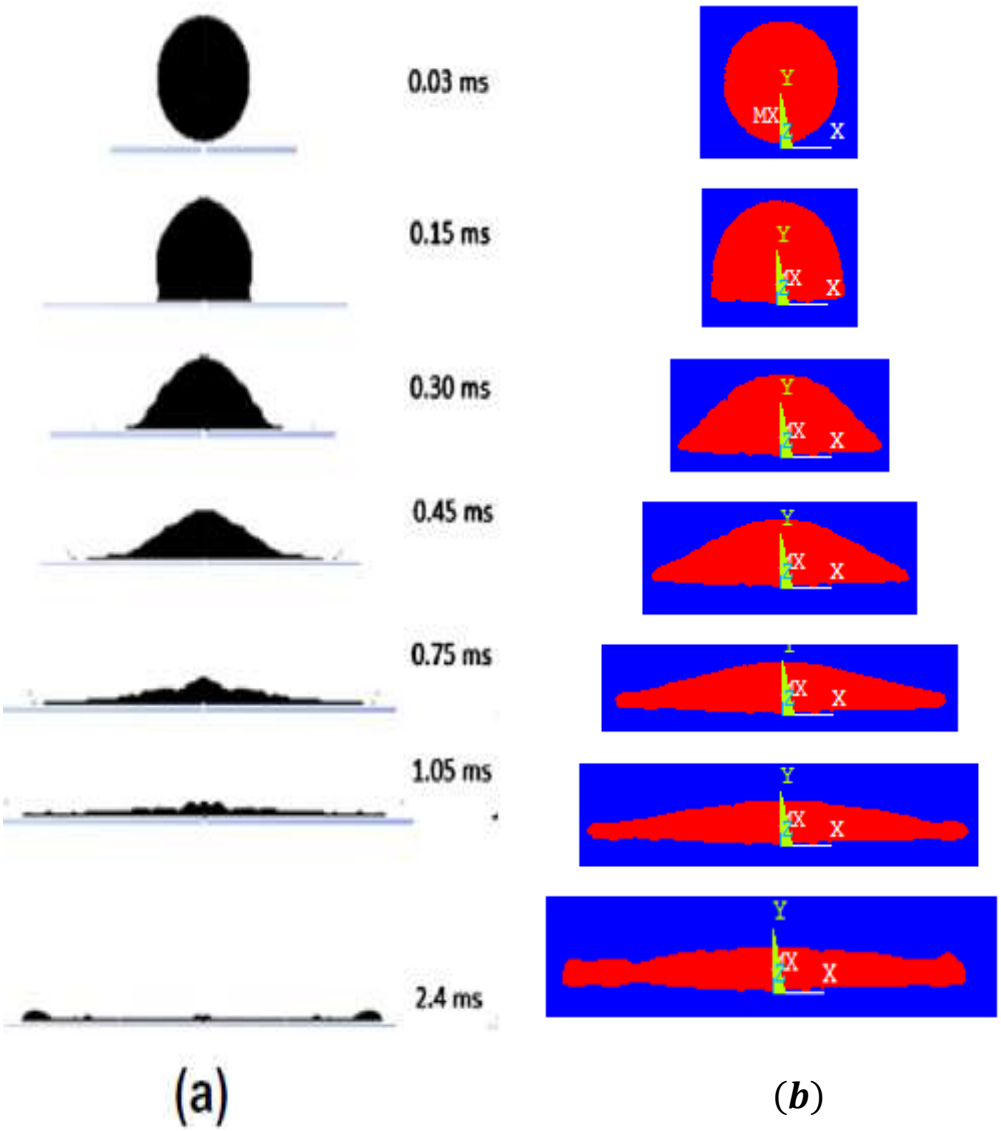


Figure III.3 : impact séquentielle d'une goutte de aluminium de 2.2 mm de diamètre avec une vitesse initiale 4m /s et une température de 519°C sur un substrat en acier initialement à 298°C.

la figure (III.4) représente comparaison entre les facteures d'étalement de notre simulation avec simulation d' Arvind Kumar

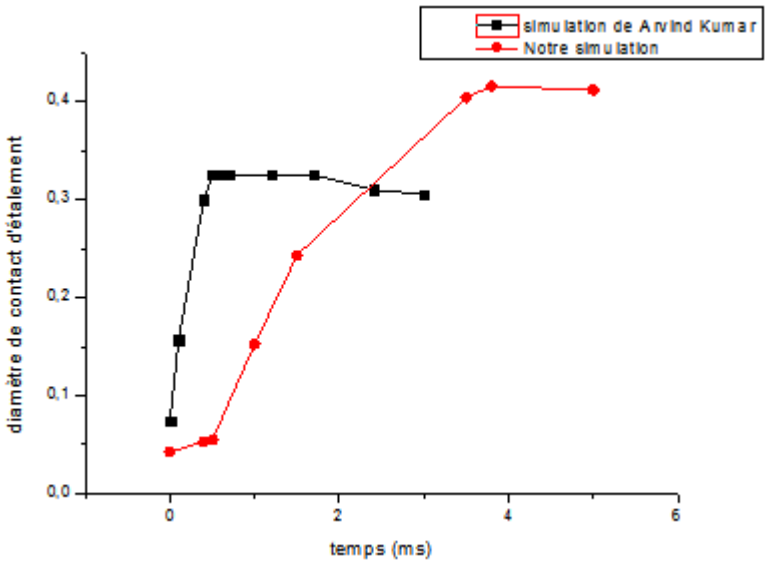


Figure (III.4) : comparaison entre les diamètre des contacte d'ètalment dans les memes conditions.

III.7-Etude de l'impact de la gouttelette d'alummin creuse :

Apres qu' on a arrivé à cette resultats , on a interveni des changements en metant un vide (crouse) dans la gouttelette d'alummin avec trois diametres difirents 25%,50%te 75% de diametr initial voir la figure (III.5).

En premier lieu ,on a fixi la température de substrat en variant la température de l'air et ensuitel'inverse.

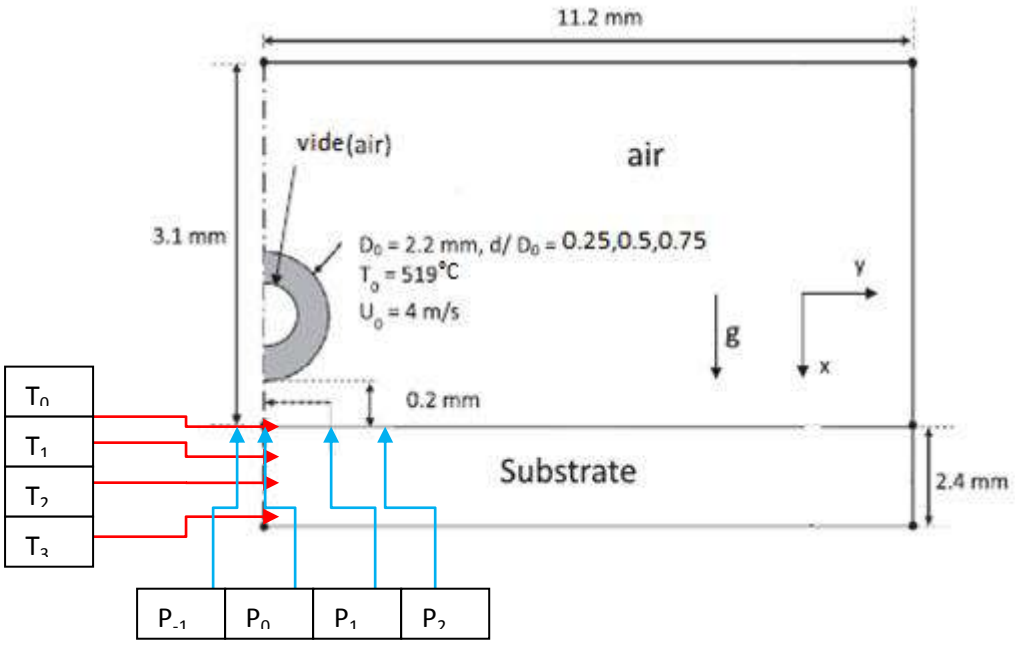


Figure III.5 : impact de la gouttelette d'alummin creuse .

Ensuite, nous avons identifié quatre points pour être en mesure d'étudier la température et quatre moins la pression des faits afin d'étudier ses coordonnées sont indiquées dans le tableau(III.2).

Point	X	Y
T_0	$0.4498.10^{-4}$	0
T_1	$0.4498.10^{-4}$	$0.53333.10^{-3}$
T_2	$0.4498.10^{-4}$	$0.35556.10^{-3}$
T_3	$0.4498.10^{-4}$	$0.17778.10^{-3}$
P_{-1}	$-0.13494.10^{-3}$	0
P_0	$0.4498.10^{-4}$	0
P_1	$0.2249.10^{-3}$	0
P_2	$0.40482.10^{-3}$	0

Le tableau III.2 : les coordonnée de points de température et pression.

- Les figures suivent représentes la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette creuse qui à une température initiale de 519k et la température de jet au voisinage de substrat, que nous proposons de l'étudier pour des valeurs (300 k ; 400k ; 500k et 600k) respectivement, tout en présence de vide à trois pourcentages ; (25 %, 50% et 75 %) ; sur un substrat à température initiale égale à 298k.

III.7.1La température d'are T=300°C.

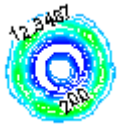
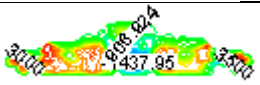
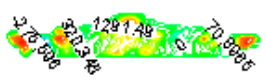
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

Figure (III.6) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre en présence de vide ,pour une température de vide égale à T =300°C

La figure (III.6) qui représente la distribution de température pendant l'impact des gouttes creuse dans un substrat.

On a remarque que :

- les gouttelettes d'aluminium commence a se propagation à 0.15ms.
- la vitesse d'impact au diamètre de creuse 25% gronde par apport 50% et 75%

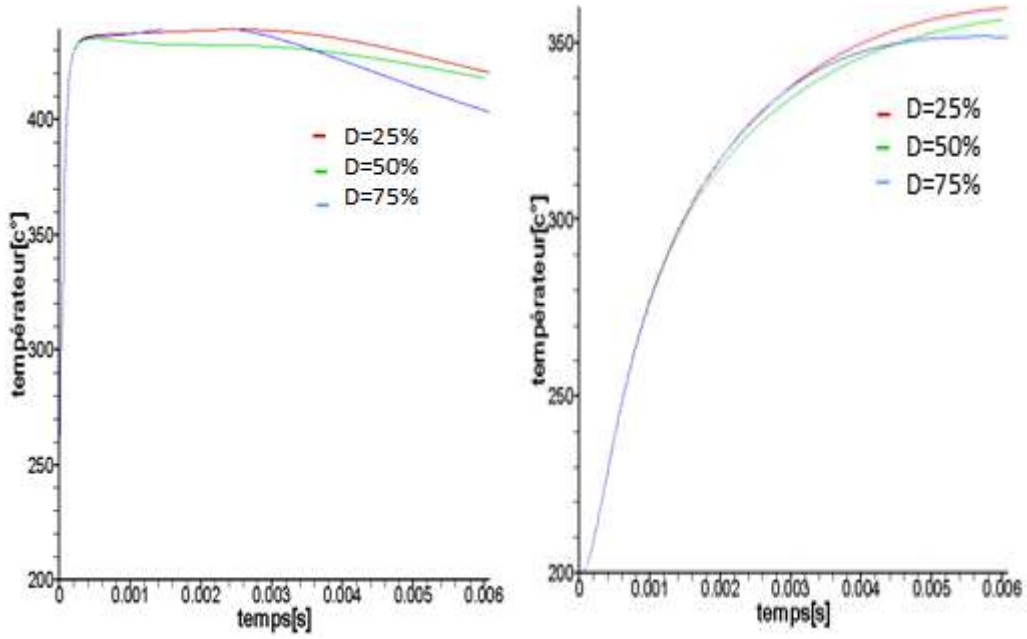


Figure III.6.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.6.b:** graphe de température au point T_1.

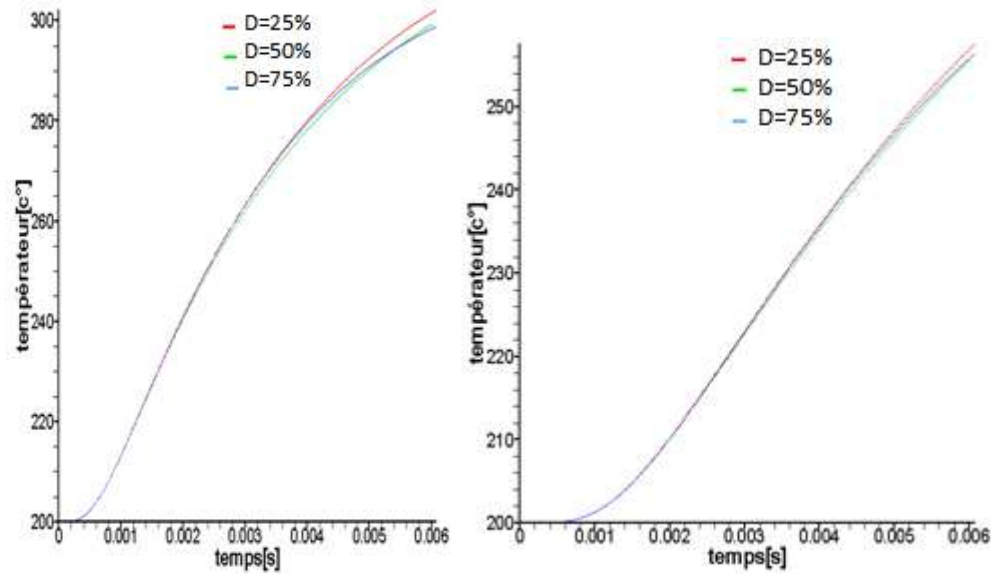


Figure III.6.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.6.d:** graphe de température au point T_3.

Les figures III 6-a ,b,c et d qui représente les résultats de simulation pour les profiles de température dans le temps pour quatre position dans le substrat, des particules creuses à une température de vide égale à T =300°c.

- Il est clairement visible l'apparaissions des zones de bonne contacte à l'interface particule/substrat ; suggère un bon transfert de chaleur ; de la

particule vers le substrat ,donc pour les premier moment de l'étalement on peut dire que le transfert de chaleur ce fait transversalement.

- On peut constater aussi que, la température est quasi-constante en profondeur du substrat après l'étalement total de la particule , ce qui explique que la solidification ce fait dans la lamelle de manière radiale parallèlement au substrat.

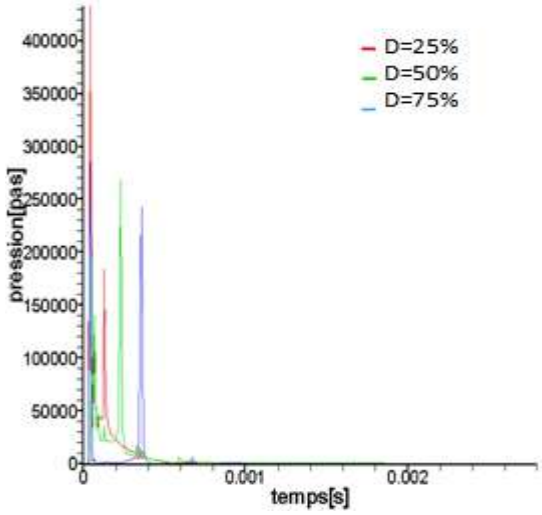


Figure III.6.e: graphe de pression au point P_{-1}.

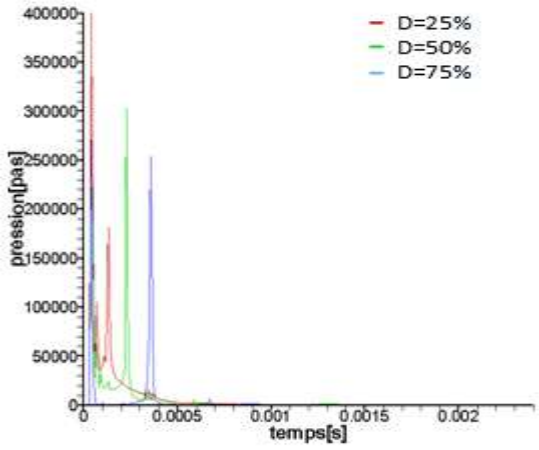


Figure III.6.f: graphe de pression au point P_0.

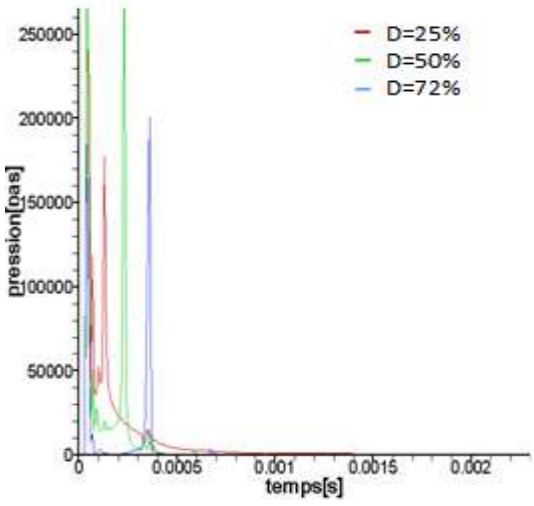


Figure III.6.g: graphe de pression au point P_1.

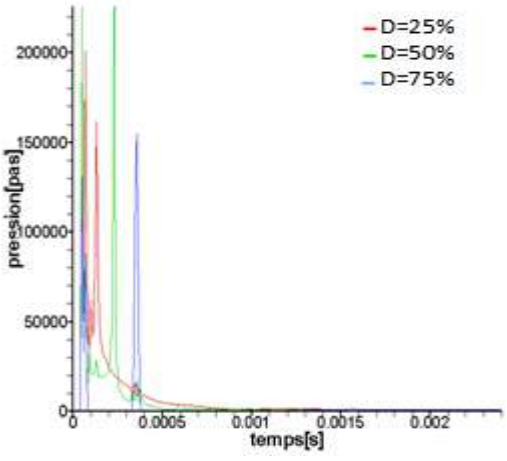


Figure III.6.h: graphe de pression au point P_2.

Les figures III 6-e,f,g,h, qui représente les résultats de simulation pour les profiles de pression au point d'impact pour les trois pourcentages de vide dans la goutte proposé. Ou on peut remarqué :

- Initialement la pression est plus élevé au point d'impact (le premier pique)(sous la lamelle) qui permet l'accrochage mécanique lamelle/substrat et qui produit par conséquent une faible résistance de contact .
- pour l'impact d'une goutte creuse ; le seconde pique qui témoigne la présence de vide provoque une deuxième excitation qui peut être nocif et provoque l'arrachement de la lamelle.

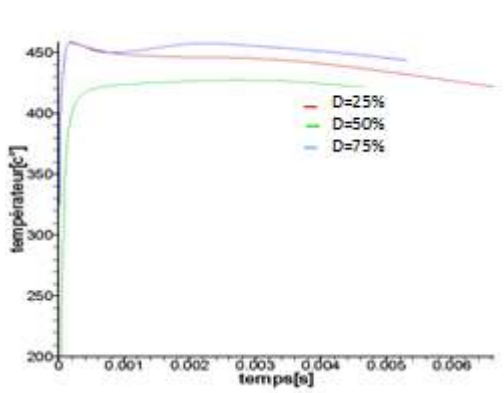
III.7.2.La température d'are T=400°C.

D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

Figure (III.7) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre en présence de vide ,pour une température de vide égale à T =400 °C .

L' analyse des résultats des expériences numérique réaliser avec comme paramètre d'étude le pourcentage de vide nous permet de dire :

- les gouttelettes d'aluminium commence a se propager à 0.15ms.
- la vitesse d'impact au diamètre de creuse 25% gronde par apport 50% et 75% .
- le modèle de transfert thermique utilise a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retarde .



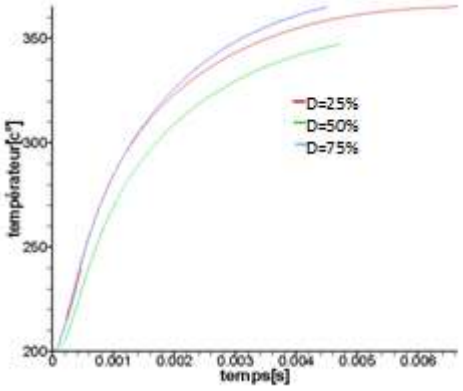
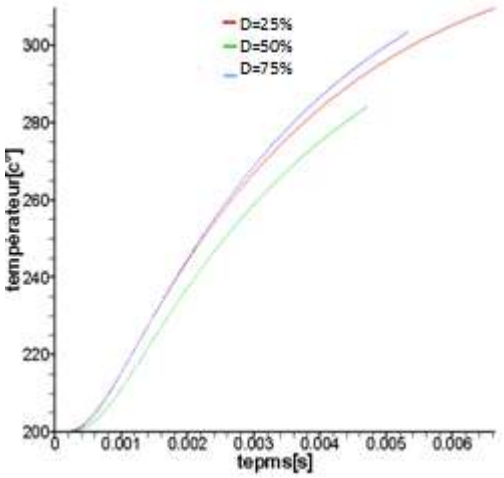


Figure III.7.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.7.b:** graphe de température au point T_1



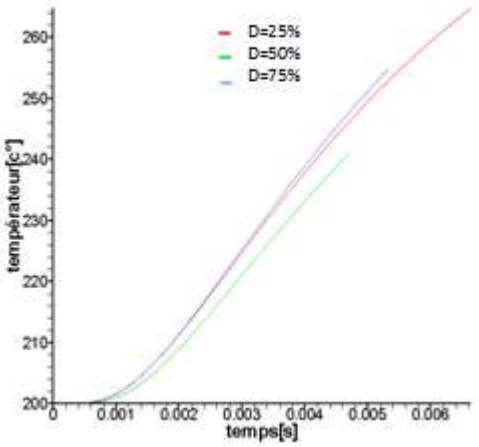


Figure III.7.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.7.d:** graphe de température au point T_3.

figure **III.7(a.b.c.d) :** Résultats de simulation pour les profiles dans le temps pour 4 position dans le substrat respectivement pour la forme creuse à t =400°c de chaque pourcentages des diamètres.

la figure III.7(a.b.c.d) représente les profiles de température au point de contacte d'une goutte d'aluminium au coure d'étalement, on note que ; dés le premier contacte de la goutte avec la cible ; la température de ce point augmente rapidement après un étalement partie de la surface d'échange augmente et la température de ce point reste quasi –constante.

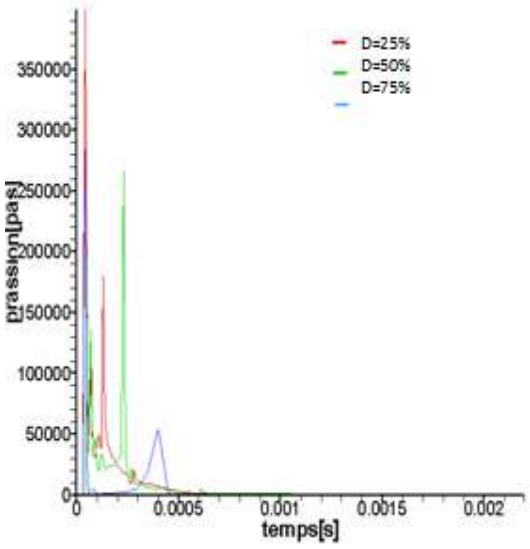


Figure III.7.e: graphe de pression au point P_{-1}.

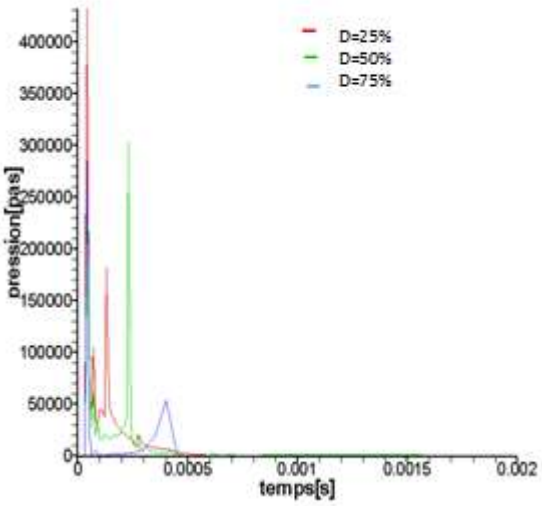


Figure III.7.f: graphe de pression au point P_0

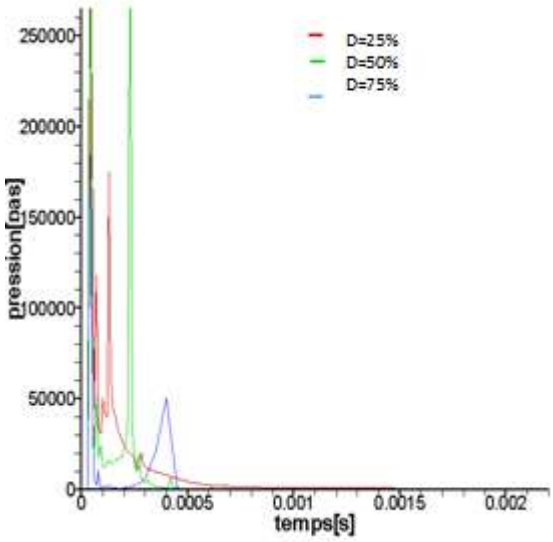


Figure III.7.g: graphe de pression au point P_1.

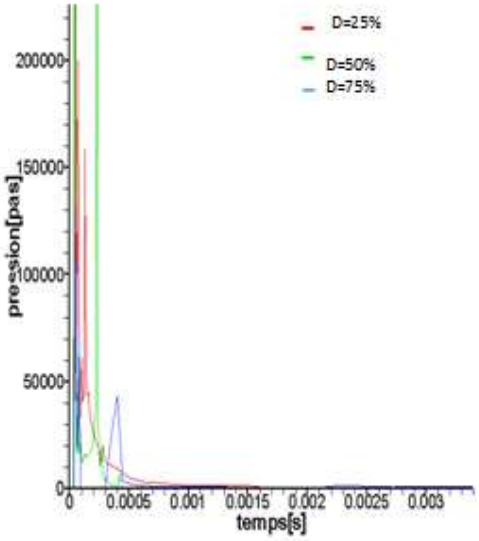


Figure III.7.h: graphe de pression au point P_2.

Sur la figure III. 5(e.f.g.h) qui représente les profiles de pression au point de contacte substrat/goutte; on remarque que :

- Initialement la pression est plus élevé au point d'impact (le premier pique)(sous la lamelle) qui permet l'accrochage mécanique lamelle/substrat et qui produit par conséquent une faible résistance de contact .
- pour l'impact d'une goutte creuse ; le seconde pique qui témoigne la présence de vide provoque une deuxième excitation qui peut être nocif et provoque l'arrachement de la lamelle.

III.7.3La température d'are T=500°C.

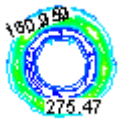
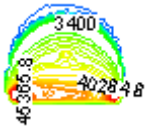
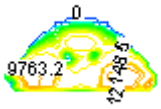
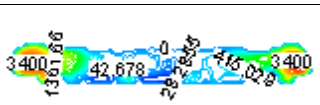
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

figure III .8 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température d'aire à T=500°C sur un substrat avec une vitesse de 4m /s .

dans cette cas on augmente la température d'aire à T=500°C

- Le changement de forme des splat figure **III.8** ne peut pas être explique par le changement de température de surface seulement.

- Il a été montré par (11) ; que le chauffage d'une plaque an acier produit une couche d'oxyde sur une surface ; qui peut entrain une augmentation de la résistance de contacte entre les gouttelettes et le substrat.
- augmente la température et diamètre remplir en rupture la surface cette remarque on regarde surtaux le bull d'aire à 75% .

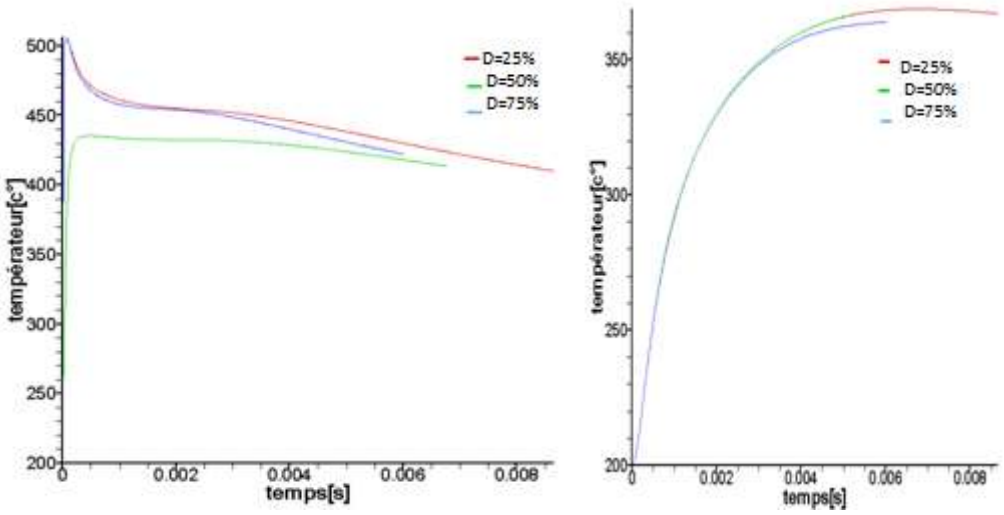


Figure III.8.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.8.b:** graphe de température au point T_1

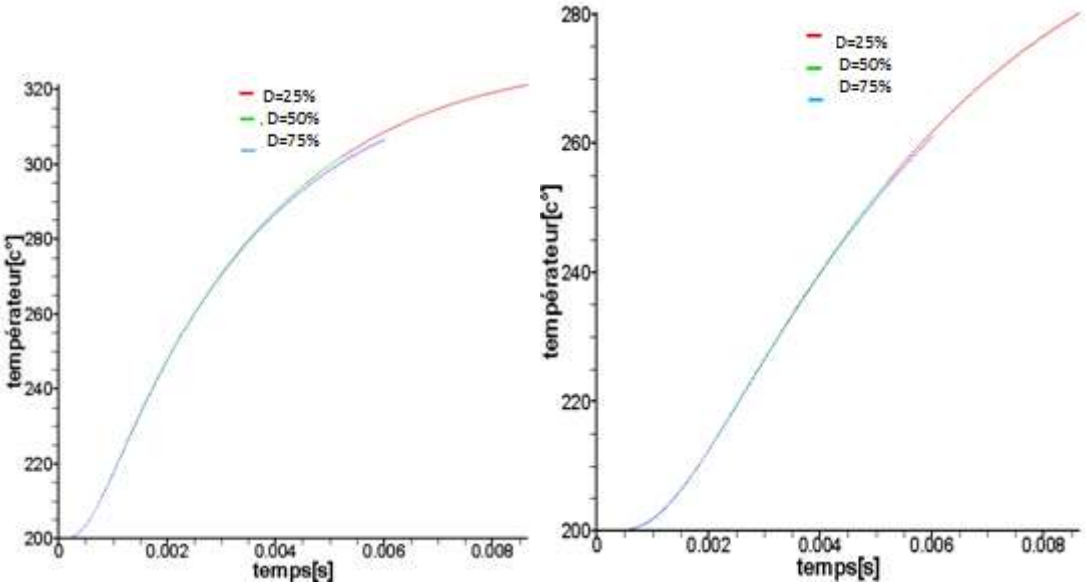
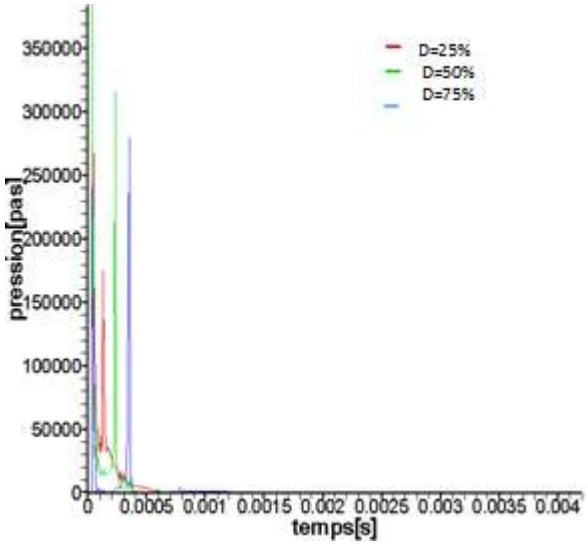


Figure III.8.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.8.d:** graphe de température au point T_3.

Les figures **III. 8(a.b.c.d) :** Résultats de simulation pour les profiles dans le temps pour 4 position dans le substrat respectivement pour la forme creuse à T=500°C de chaque pourcentages des diamètres.

la température de substrat au point d'impacte augmente rapidement et la Resistance thermique diminue .La température de substrat augmente beaucoup plus lentement alors que la température de surface de la goutte s'abaisse .

Donc la résistance de contact associée augmente ; qui favorise la diffusion thermique radiale dans la lamelle.



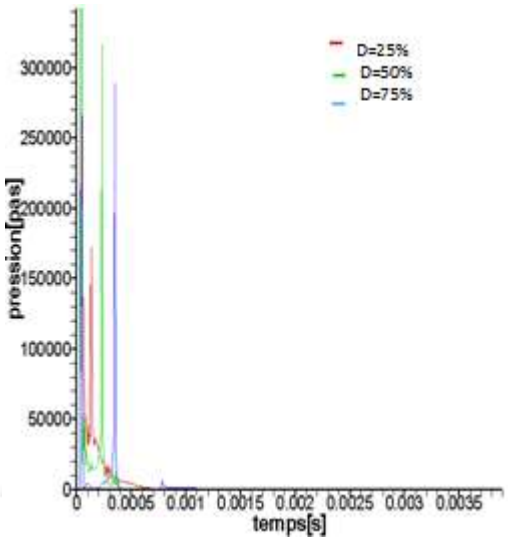
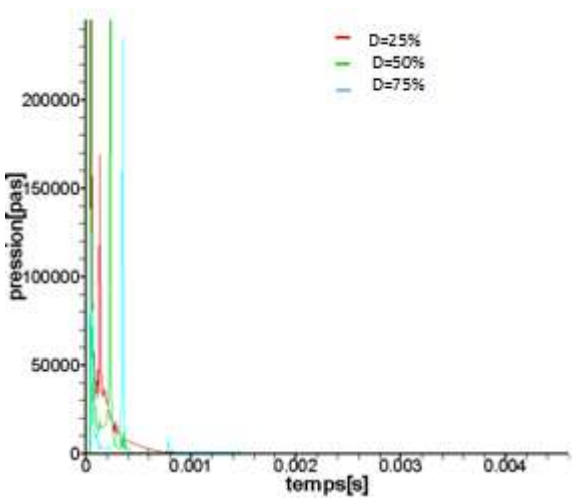


Figure III.8.e: graphe de pression au point P_{-1}. **Figure III.8.f:** graphe de pression au point P_0



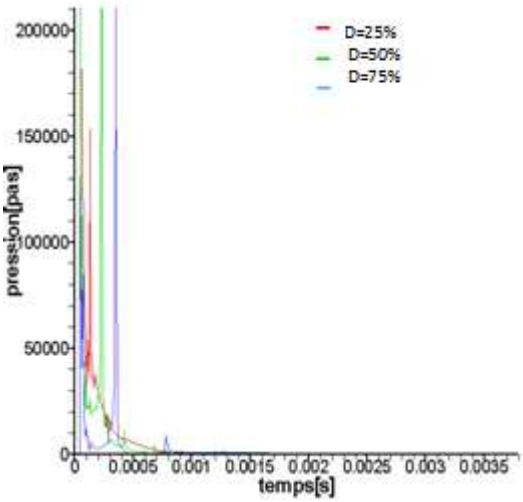


Figure III.8.g: graphe depression au point P_1. **Figure III.8.h:** graphe de pression au point P_2.

Les figures **III. 8(e.f.g.h) :** Résultats de simulation pour les profiles de pression au point d'impact les trois diamètres à cas T=500°C de bulle d'aire.

La figure(III .8.e) illustre les distribution de la pression au point d'impact au cours d'étalement de la goutte, la pression se désintègre vers zéro très rapidement .il faut notre ici que l'augmentation de pression à l'impact dans le diamètre D=50%est plus grande que celle dans (25% ; 75%). Ce qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans se cas est bonne que dans les deux autres cas. La pression rechute ; comme on lavons déjà dit ; à cause de la bulle d'aire.

III.7.4. La température d'are T=600°C.

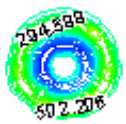
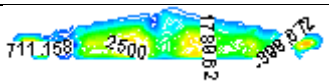
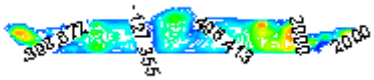
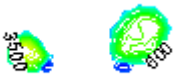
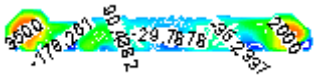
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

figure III .9 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à T =600°C sur un substrat.

Dans ce cas augmente la température de bulle d'aire à T=600°C qui on remarque :

- L'étalement max des gouttes à même temps à t=1.05 ms .
- A t=2.4 ms la goutte d'aluminium avec un creuse de diamètre D=75% a été clapisse par contre les deux autres .

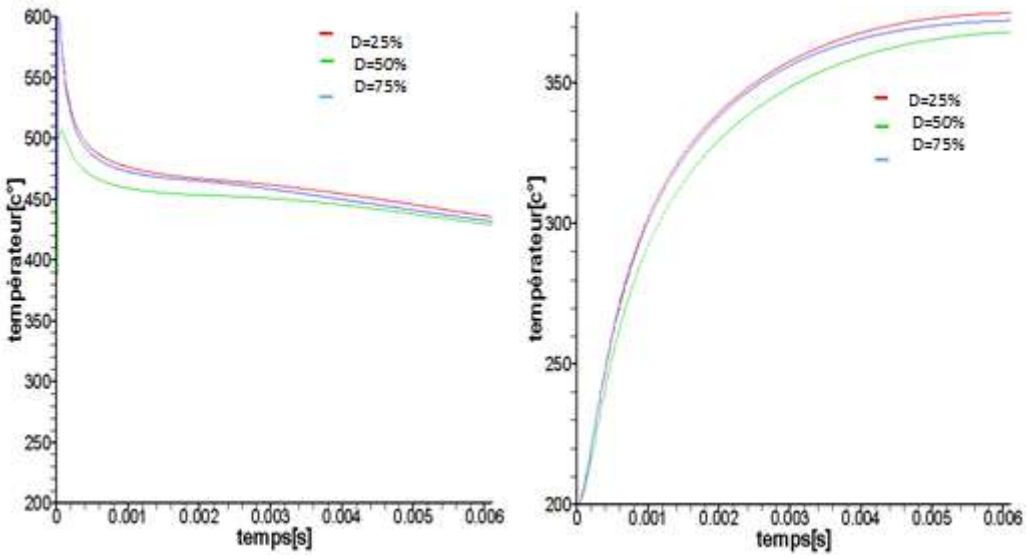


Figure III.9.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.9.b:** graphe de température au point T_1

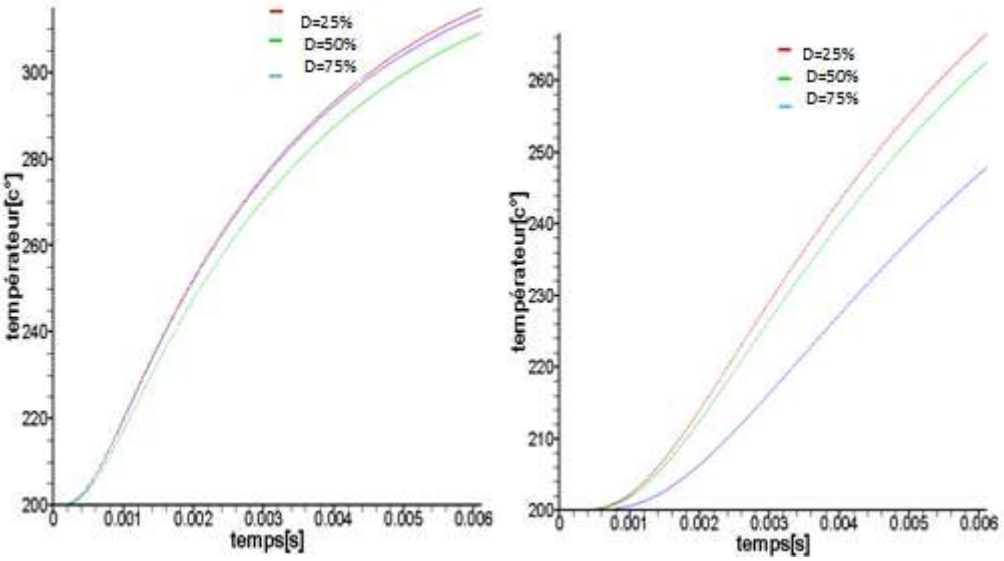


Figure III.9.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.9.d:** graphe de température au point T_3.

figure **III .9(a.b.c.d) :** Résultats de simulation pour les profiles dans le temps pour quatre position dans le substrat respectivement pour la forme creuse à T=500°c de chaque pourcentages des diamètres.

- Il est clairement visible l'apparaissions des zones de bonne contacte à l'interface particule/substrat ; suggère un bon transfert de chaleur ; de la particule vers le substrat ,donc pour les premier moment de l'étalement on peut dire que le transfert de chaleur ce fait transversalement.

- On peut constater aussi que, la température est quasi-constante en profondeur du substrat après l'étalement total de la particule , ce qui explique que la solidification ce fait dans la lamelle de manière radiale parallèlement au substrat.

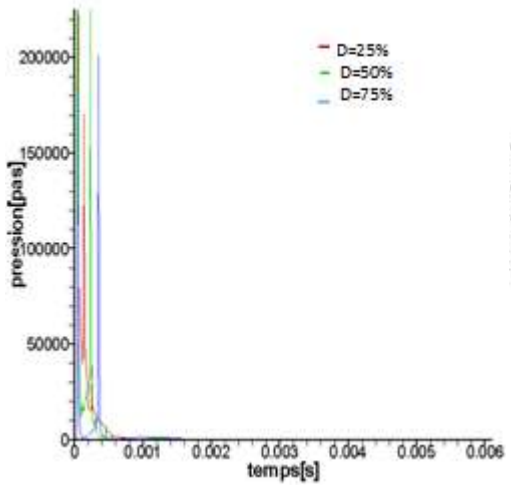


Figure III.9.e: graphe de pression au point P_{-1}.

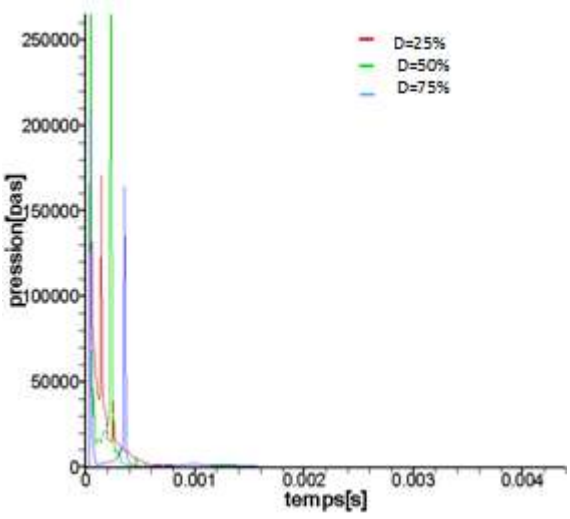


Figure III.9.f: graphe de pression au point P_0.

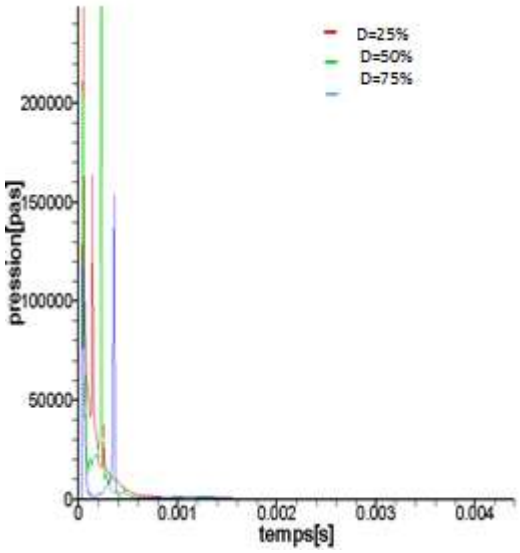


Figure III.9.g: graphe de pression au point P_1.

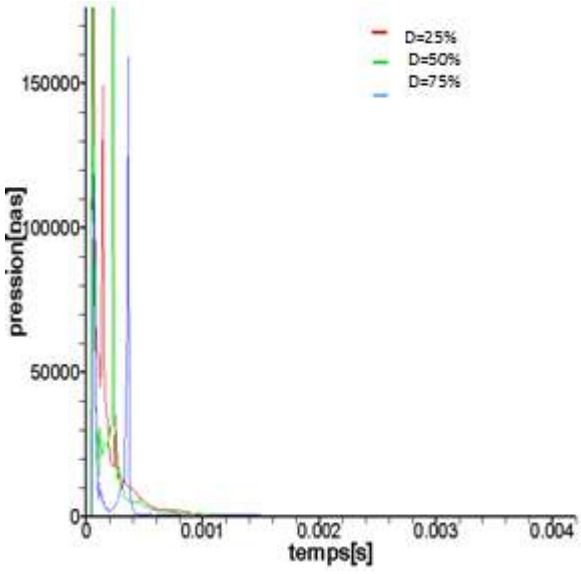


Figure III.9.h: graphe de pression au point P_2.

Les figures III .9.e.f.g.h, illustre les distribution de la pression au point d'impact au cours d'étalement de la goutte, la pression se désintègre vers zéro très rapidement .il faut notre ici que l'augmentation de pression à l'impact dans le diamètre D=50%est plus grande que celle dans (25% ; 75%). Ce qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans se cas est bonne que dans les deux autres cas. La pression rechute ; comme on lavons déjà dit ; à cause de la bulle d'aire.

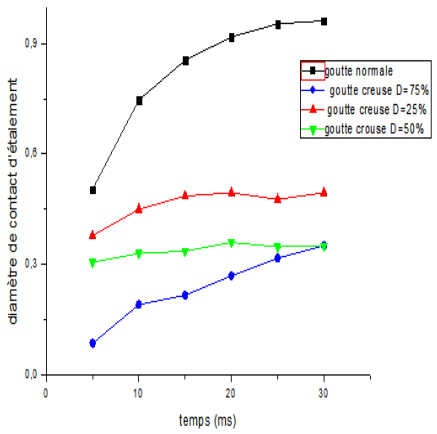


Figure III.10.a : diamètre de contact d'étalement pour T=300°c.

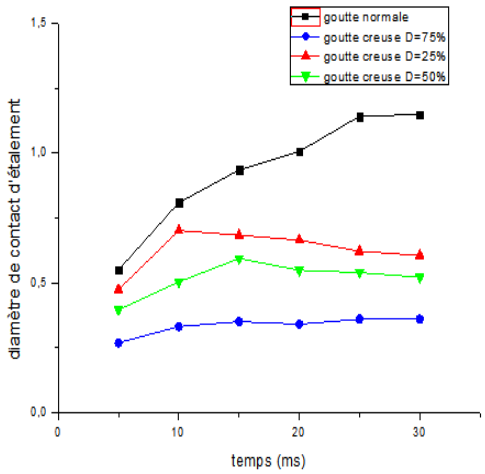


Figure III.10.b : diamètre de contact d'étalement pour T=400°C

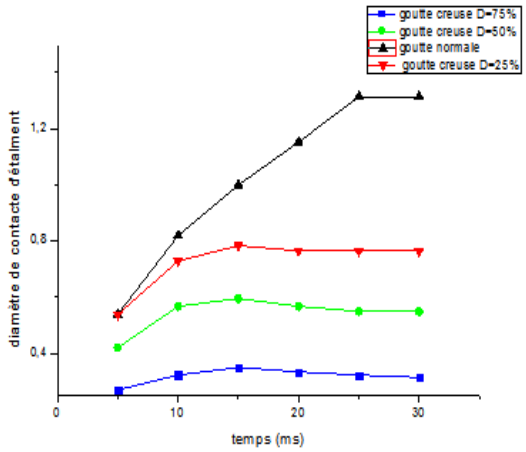


Figure III.10.c : diamètre de contact D'étalement pour T=500°c.

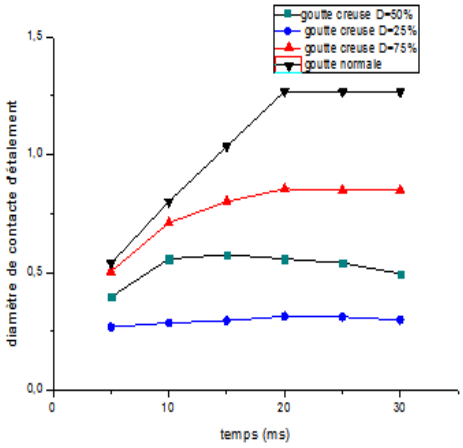


Figure III.10.d : diamètre de contact D'étalement pour T=600°C

les figures III.10(a.b.c.d)représente des résultats comparatifs des diamètre d'étalement de la goutte d'aluminium plaine et creuse pour quatre valeur de température de l'état de fusion de la particule (300,400,500,600)°C respectivement.

Ou on peut constater que :

- Le diamètre d'étalement de la goutte varie proportionnellement avec la quantité de matière dans la particule.
- La température de l'état de fusion influence directement la vitesse d'étalement ;si T=500 on trouve t_{et}=25ms et si T=600 on trouve t_{et}=20ms
-

- Les figures suivent représentes la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette creuse qui à une température initiale de 519°C et la température de jet initiale de 298°C au voisinage de substrat, tout en présence de vide à trois pourcentages ; (25 %, 50% et 75 %) ; sur un substrat que nous proposons de l'étudier pour des valeurs (300 °C ; 400°C ; 500°C et 600°C) respectivement.

III.7.5.Température de substrat T=300°C :

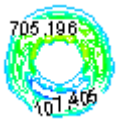
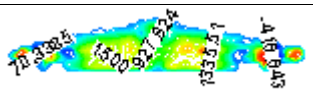
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

Figure (III.11) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à t =298°C sur un substrat de température à t=300°C avec une vitesse de 4m /s.

La figure **(III.11)** qui représente la distribution de température pendant l'impact des gouttes creuse dans un substrat ; Le flux latéral de matière provenant de la partie centrale et la séparation grande vitesse du principal bord de lamelle ont formé en périphérie.

- Le préchauffage de substrat a retardé un peu le début de la solidification ; de sorte que le centre des splats est légèrement plus grand ;les éclaboussures sont un peu réduites.
- L'étalement de goutte à vide 75% est très faible par rapport aux normes des deux gouttes à vide 25% ;50%.
- L'étalement de goutte à vide elle est très complet à température finale t =6ms et aucune changement formule de surface .
- On Mémé remarque qui étude à goutte de vide l'aire à 50%.

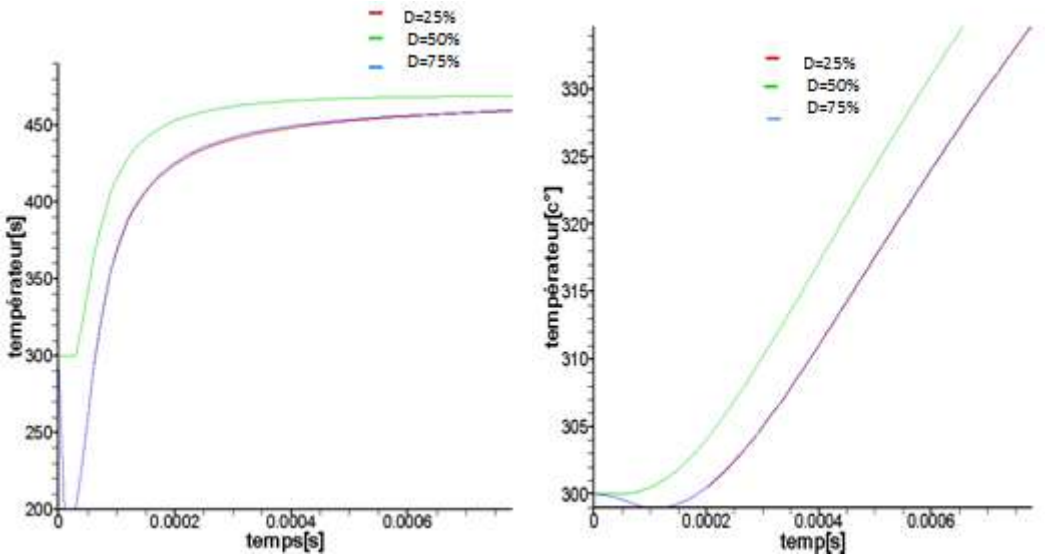


Figure III.11.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.11.b:** graphe de température au point T_1

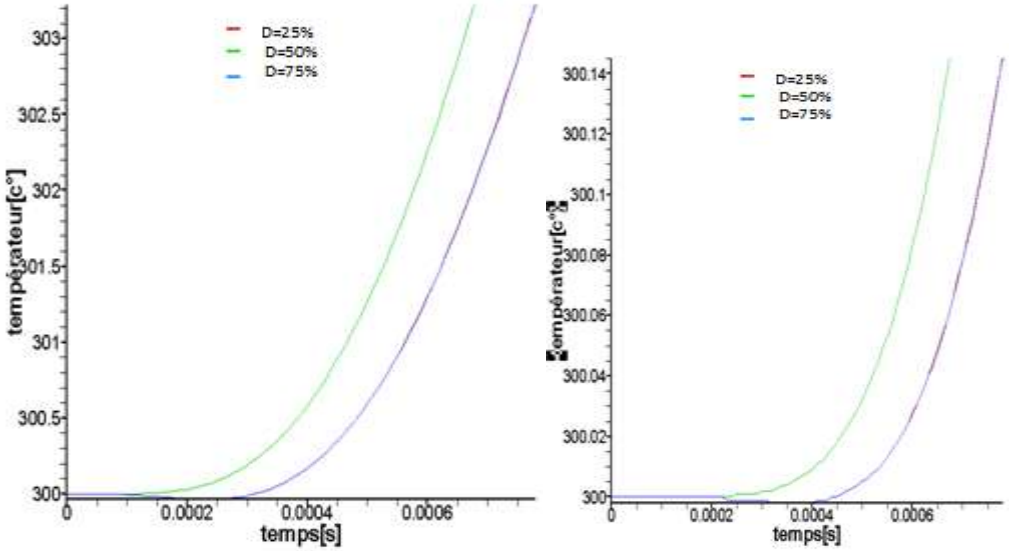


Figure III.11.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.11.d:** graphe de température au point T_3

On remarque :

- An point d'impact à figure(III.11.a) la température est augment très rapidement à t=0.0002s ; avant cette temps la température est reste consente à toute les temps.
- Même point d'impacte ; la changement de température à (D=25% et D=75%) c'est même ; c'est-à-dire la température est rechute .
- Pour trois cas la température (T= 300°c)reste consente par un temps (0 ; 0.0002) s avants cette temps la température est augmente très rapide jusqu'à T=307°c.

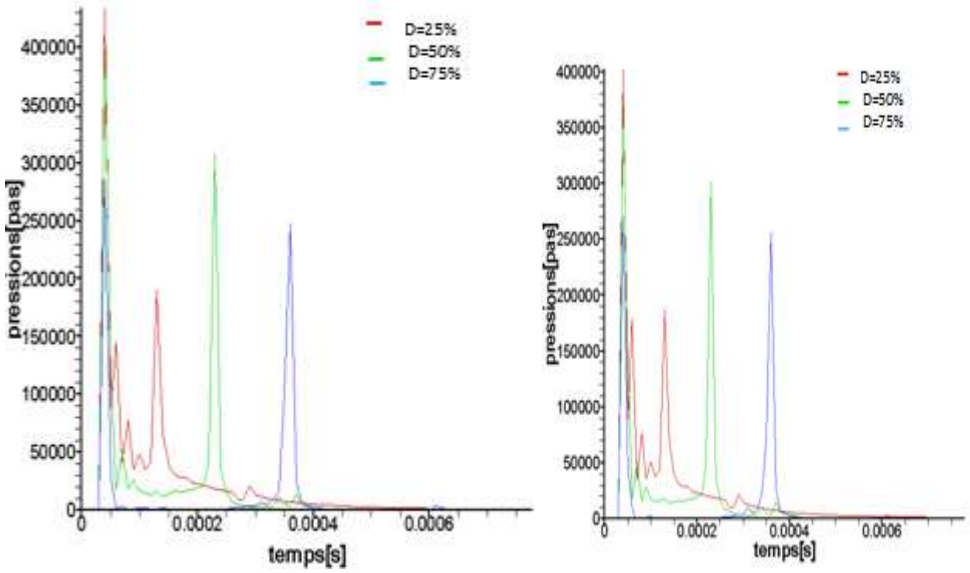
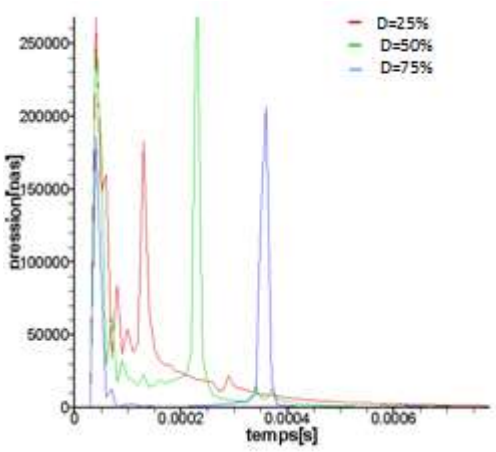


Figure III.11.e: graphe de pression au point P_{-1}. **Figure III.11.f:** graphe de pression au point P_0.



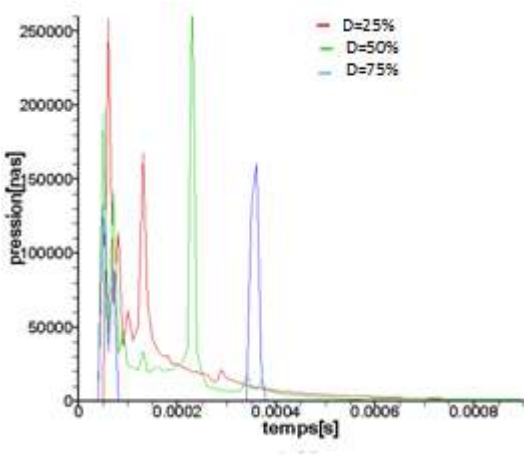


Figure III.11.g: graphe de pression au point P_1. **Figure III.11.h:** graphe de pression au point P_2.

De plus ; la figure illustre les distributions de la pression au point d'impact au cours de l'étalement de la goutte.

- Dans les trois gouttes la pression augmente attient le seuil puis rechute conformément à la norme ; ce qui implique une bonne interaction goutte/substrat.
- L'augmentation s'explique par l'impact de la partie de la matière de la goutte située avant la bulle d'aire.
- La pression augmente très rapidement, avant de rechuter puis regagner l'augmentation.

III.7.6.Température de substrat T=400°C :

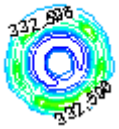
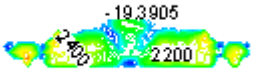
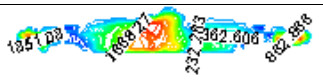
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

Figure (III.12) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à t =298°C sur un substrat de température à t=400°C.

On augmente la température de substrat à T=400°c on observé :

- Le préchauffage de substrat a retardé un peu le début de la solidification ; de sorte que le centre des splats est légèrement plus grand ;les éclaboussures sont un peu réduites.
- L'étalement de goutte à vide 75% est très faible par rapport aux normes des deux gouttes à vide 25% ;50%.
- L'étalement de goutte à vide elle est très complet à température finale t =6ms et aucune changement formule de surface .
- On Mémé remarque qui étude à goutte de vide l'aire à 50%.

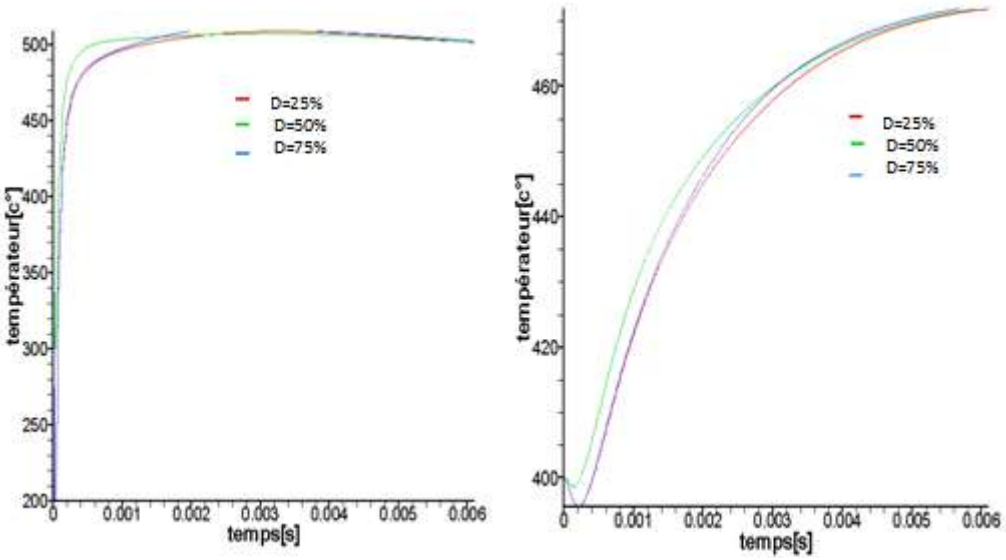


Figure III.12.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.12.b:** graphe de température au point T_1

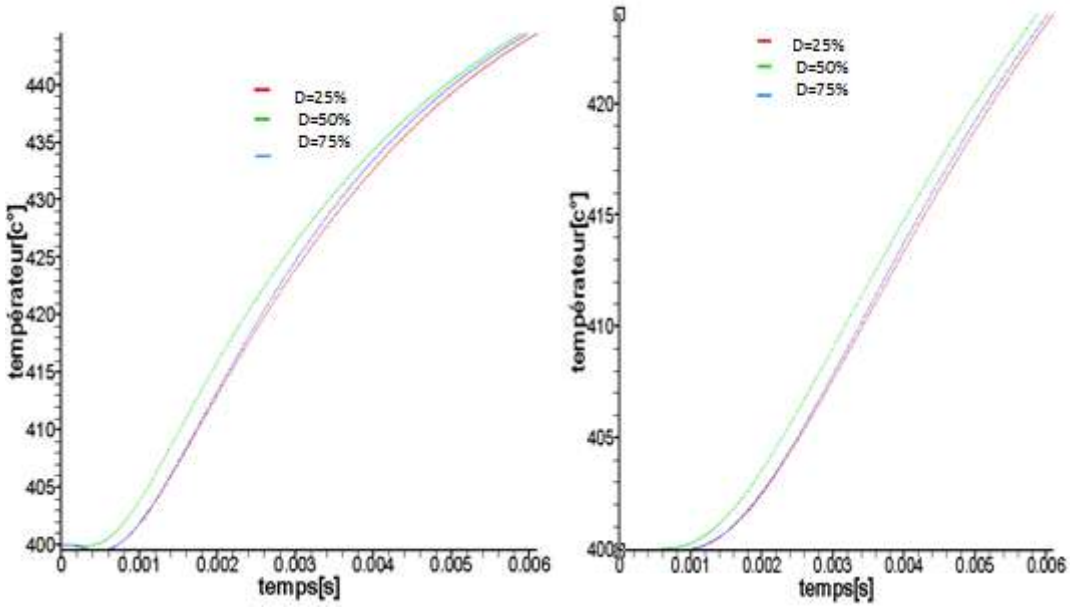


Figure III.12.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.12.d:** graphe de température au point T_3

- An point d'impact à figure(III.12.a) la température est augment très rapidement à t=0.0004s ; avant cette temps la température est reste consente à toute les temps.
- figure (III.12.b),a t=0 s la température T=400°c et démuni jusqu'à 0.0001s en sut la température augmenté rapidement .
- figure (III.12.c), au temps t=0 la température T=400°c appris cette temps la température démuni jusqu'à t=0.0004s et en sut la température augmenté rapidement .
- figure (III.12.d), la température constante jusqu'à t=0.001s et en sut la température augmenté rapidement .

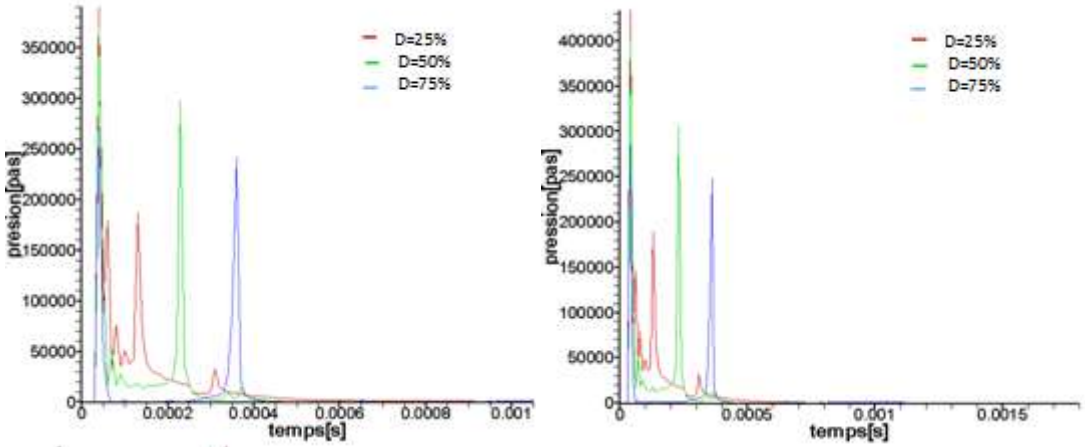


Figure III.12.e: graphe de pression au point P_{-1}. **Figure III.12.f:** graphe de pression au point P_0.

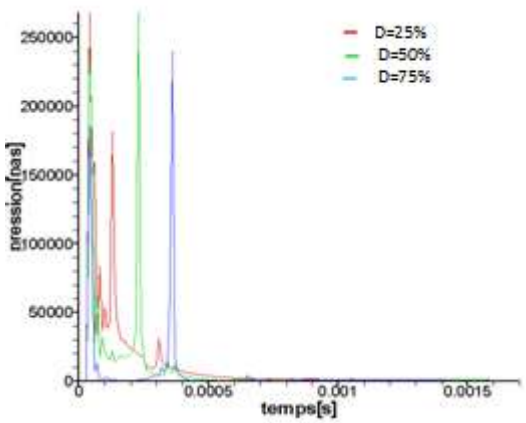


Figure III.12.g: graphe de pression au point P_1.

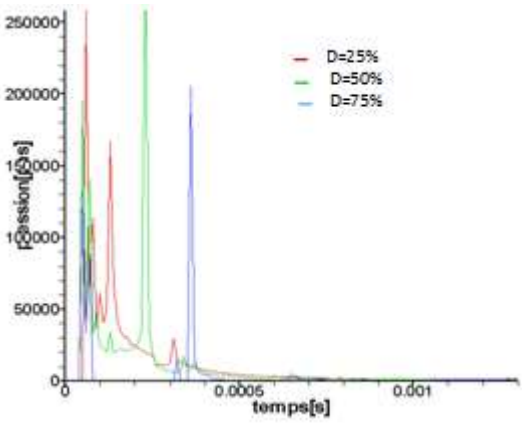


Figure III.12.h: graphe de pression au point P_2.

De plus ; la figure illustre les distribution de la pression au point d'impact au cours de l'étalement de la goutte .

- Dans les trois gouttes la pression augmente attient le seuil puis rechute conformément à la norme ; ce qui implique une bonne interaction goutte/substrat.
- L'augmentation s'explique par l'impact de la partie de la matière de la goutte située avant la bulle d'aire.
- La pression augmente très rapidement, avant de rechuter puis regagner l'augmentation.

III.7.7.Température de substrat T=500°C :

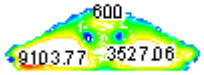
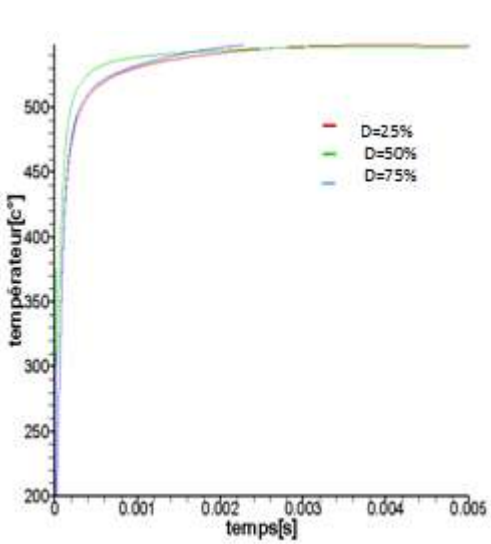
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

Figure (III.13) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à t =298°C sur un substrat de température à t=500°C.

On augmente la température de substrat à T=500°c on observé :

- Le préchauffage de substrat a retardé un peu le début de la solidification ; de sorte que le centre des spalts est légèrement plus grand ;les éclaboussures sont un peu réduites.
- L'étalement de goutte à vide 75% est très faible par rapport aux normes des deux gouttes à vide 25% ;50%.
- L'étalement de goutte à vide elle est très complet à température finale t =6ms et aucune changement formule de surface .
- On Mémé remarque qui étude à goutte de vide l'aire à 50%.



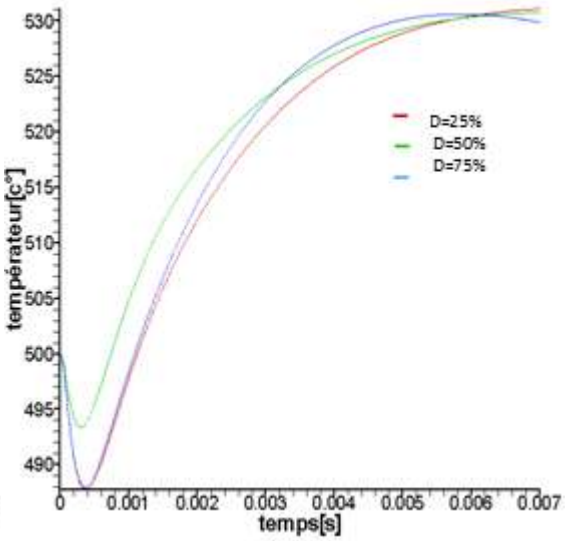
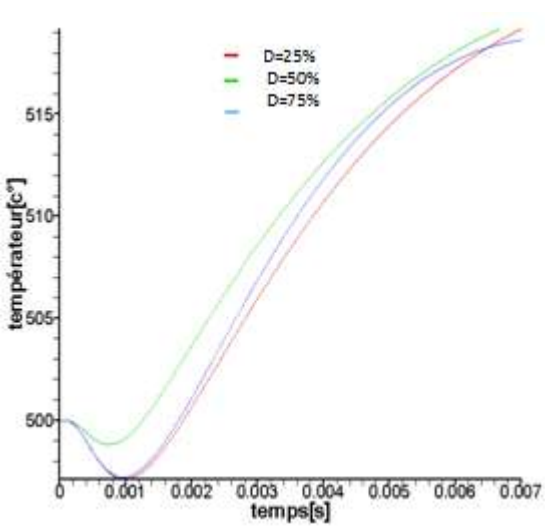


Figure III.13.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.13.b:** graphe de température au point T_1



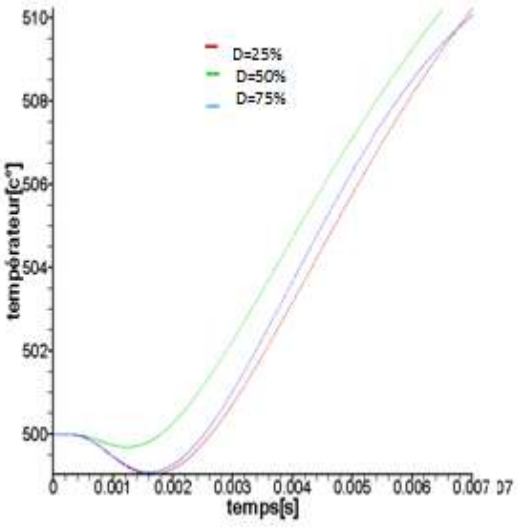


Figure III.13.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.13.d:** graphe de température au point T_3

- An point d'impact à figure(III.13.a) la température est augment très rapidement à t=0.0002s ; avant cette temps la température est reste consente à toute les temps.
- figure (III.13.b),a t=0 s la température T=500°c et démuni jusqu'à 0.0002s en sut la température augmenté rapidement .
- Figure (III.13.c), au temps t=0 la température T=500°c appris cette temps la température démuni jusqu'à t=0.001s et en sut la température augmenté rapidement .
- Figure (III.13.d), la température démuni jusqu'à t=0.0018s et en sut la température augmenté rapidement .

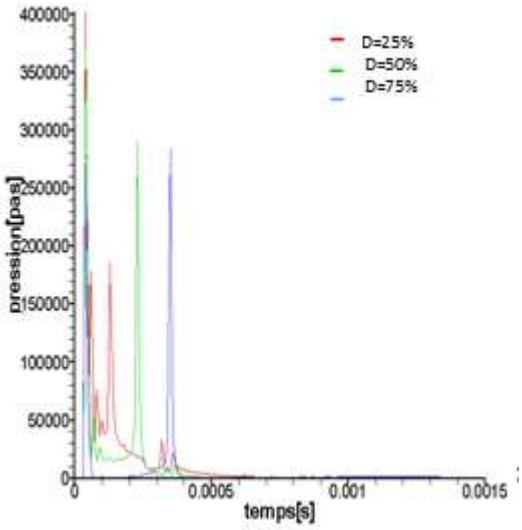


Figure III.13.e: graphe de pression au point P_{-1}.

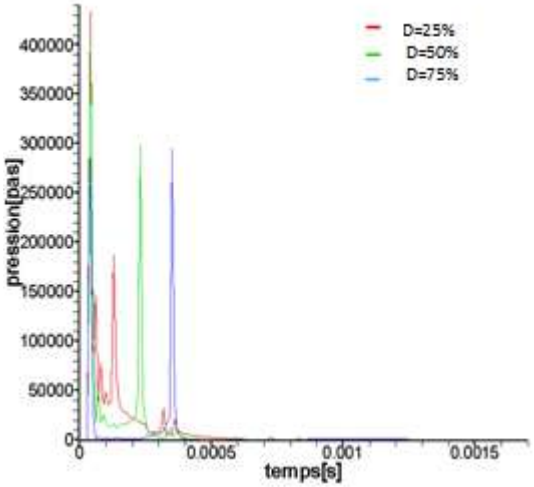


Figure III.13.f: graphe de pression au point P_0.

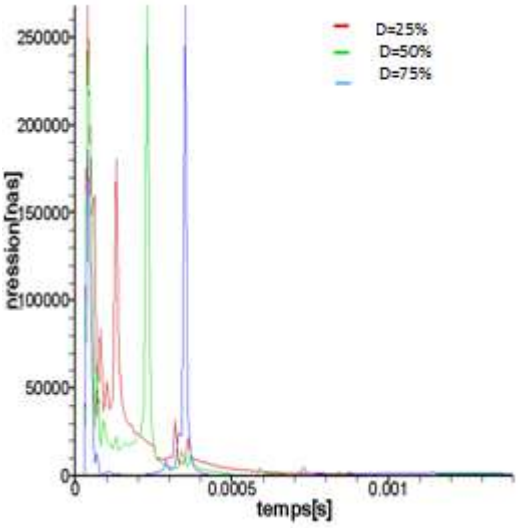


Figure III.13.g: graphe de pression au point P_1.

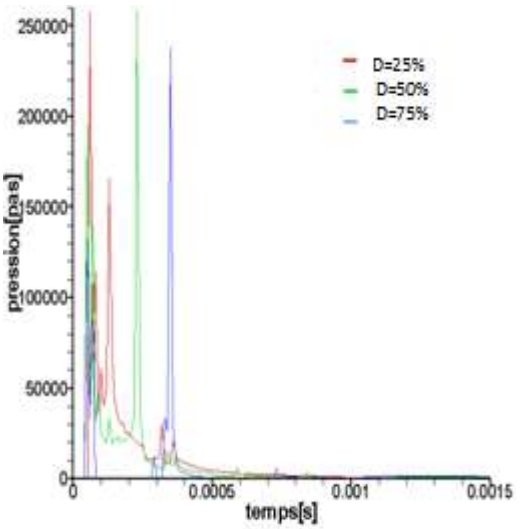


Figure III.13.h: graphe de pression au point P_2.

De plus ; la figure illustre les distribution de la pression au point d'impact au cours de l'étalement de la goutte .

- Dans les trois gouttes la pression augmente attient le seuil puis rechute conformément à la norme ; ce qui implique une bonne interaction goutte/substrat.
- L'augmentation s'explique par l'impact de la partie de la matière de la goutte située avant la bulle d'aire.
- La pression augmente très rapidement, avant de rechuter puis regagner l'augmentation.

III.7.8.Température de substrat T=600°C :

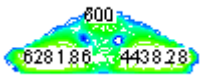
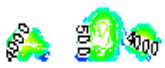
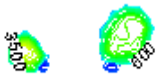
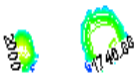
D[mm] / T[ms]	0.25	0.50	0.75
0.03			
0.15			
0.3			
0.45			
0.75			
1.05			
2.4			
3.6			
6			

Figure (III.14) : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 2.2mm de diamètre avec creuse de température de bull d'aire à t =298°C sur un substrat de température à t=600°C.

On remarque

- L'étalement de goutte avec un vide de 25% l'étalement est très normale.
- L'éclaboussement de la particule pour cet état de fusion apparait nécessairement si le vide représentatif est supérieur à 25%.

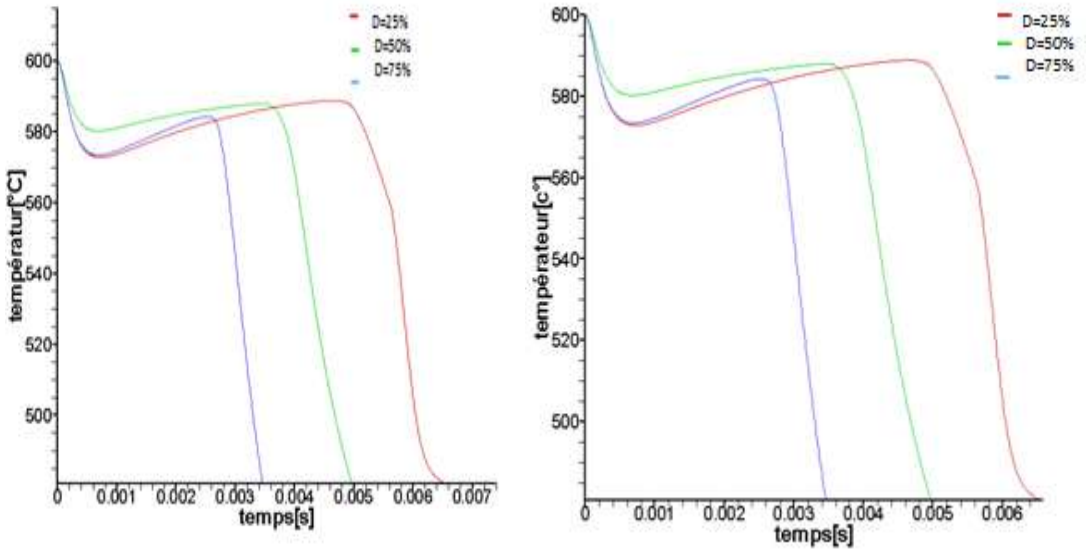


Figure III.14.a: graphe de température au point T_0. **Figure III.14.b:** graphe de température au point T_1

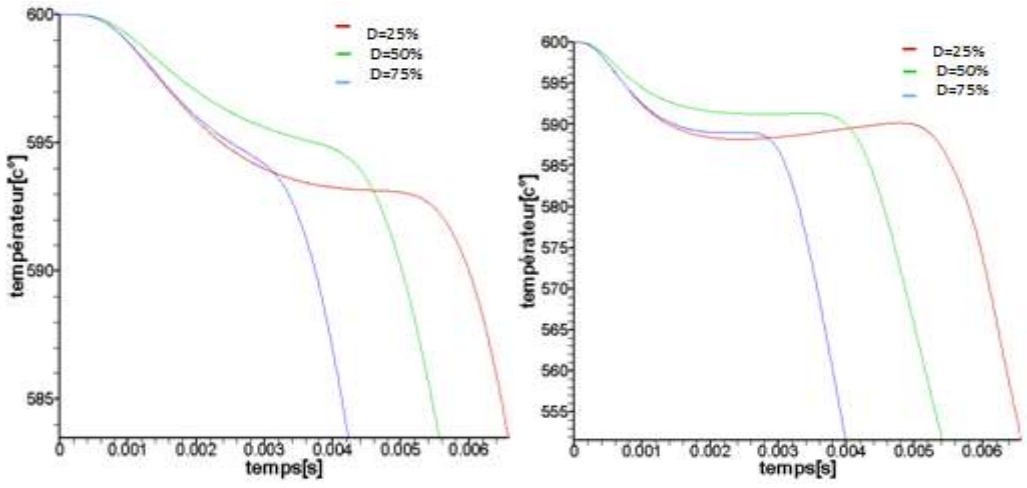


Figure III.14.c: graphe de température au point T_2. **Figure III.14.d:** graphe de température au point T_3

- A t=0 s la température T=600°c et démuni jusqu'à 0.0002s en sut la température augmenté pour un sortant moment pues démuni.

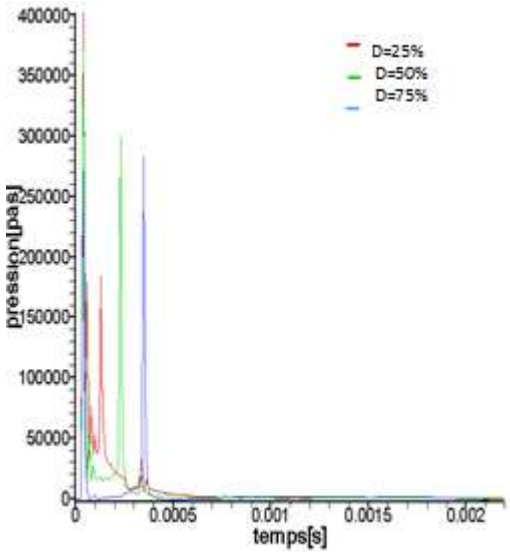


Figure III.14.e: graphe de pression au point P_{-1}.

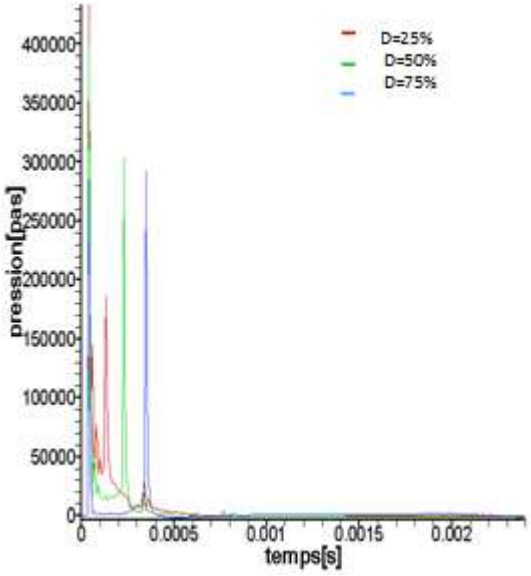


Figure III.14.f: graphe de pression au point P_0.

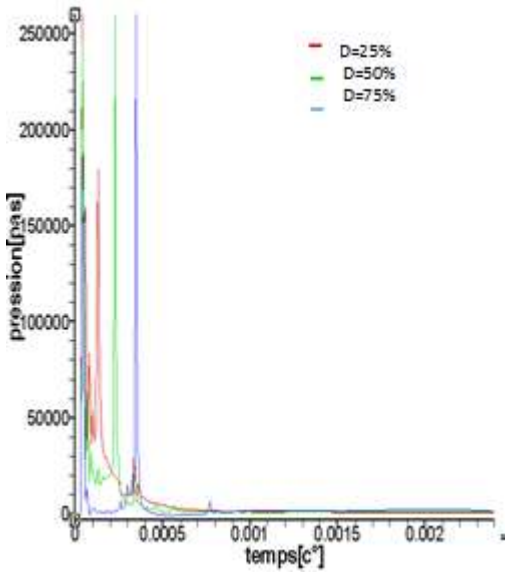


Figure III.14.g: graphe de pression au point P_1.

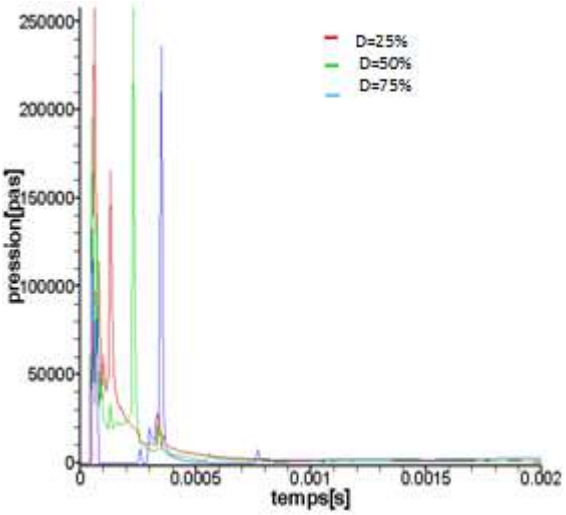


Figure III.14.h: graphe de pression au point P_2.

De plus ; la figure illustre les distribution de la pression au point d'impact au cours de l'étalement de la goutte .

- Dans les trois gouttes la pression augmente attient le seuil puis rechute conformément à la norme ; ce qui implique une bonne interaction goutte/substrat.
- L'augmentation s'explique par l'impact de la partie de la matière de la goutte située avant la bulle d'aire.
- La pression augmente très rapidement, avant de rechuter puis regagner l'augmentation.

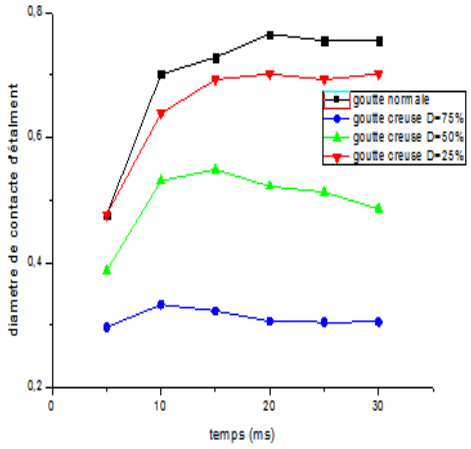


Figure III.15.a : diamètre de contact d'étalement pour T=300°c.

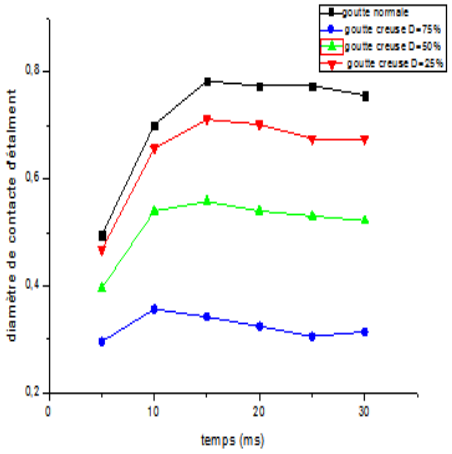


Figure III.15.b : diamètre de contact d'étalement pour T=400°C

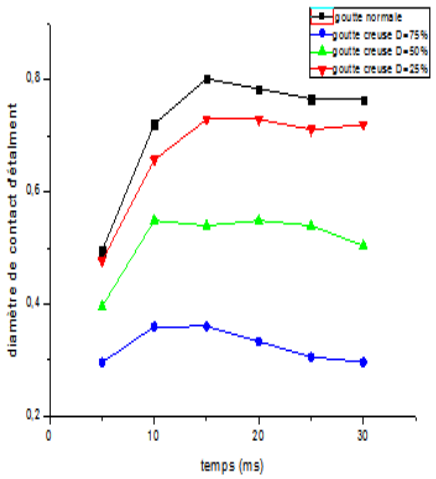


Figure III.15.c : diamètre de contact

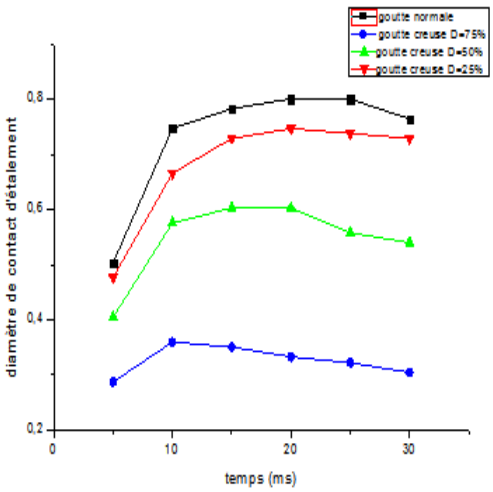


Figure III.15.d : diamètre de contact

d'étalement pour T=500°c. d'étalement pour T=600°C

les figures III.15(a.b.c.d) représente des résultats comparatifs des diamètre d'étalement de la goutte d'aluminium plaine et creuse pour quatre valeur de température de substrat (300,400,500,600)°C respectivement.

Ou on peut constater que :

- Le diamètre d'étalement de la goutte varie proportionnellement avec la quantité de matière dans la particule.
-

III.7Conclusion

Lorsque la goutte de l'Alumine est en contact avec le substrat, elle se déforme et perd son aspect sphérique, en s'étalant plus ou moins largement sur le substrat. La solidification intervient lorsque la goutte atteint une température inférieure à la température de fusion et contribue à figer plus rapidement la matière. La couche finale se stabilise après un temps plus ou moins long.

Cette partie de travail expose donc l'état de l'art lié à la simulation numérique par EF ; formation de lamelle à partir de particule sous un problème couplé qui est l'état de fusion et la présence de vide dans la particule;

- ✓ La présence de matière dans la gouttelette d'aluminium joue un rôle sur l'étalement de la lamelle et nous constatons un meilleur étalement pour le cas d'une particule pleine.
- ✓ le modèle de transfert thermique utilise a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retarde .
- ✓ A température d'ire T=600°C et diamètre de creuse D=75% la goutte d'aluminium clapisse.
- ✓ A température de substrat T=600°C et diamètre de creuse D=50% et D=75% la goutte d'aluminium clapisse.

Conclusion générale :

L’écrasement de particules métalliques sur un substrat par projection, plasma en vue de la fabrication d'un revêtement dense est un procédé industriel largement utilisé. Mais les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont encore que partiellement maîtrisés car les interactions entre ces particules fluides, la solidification ainsi que la refusions éventuelle par projection de gouttes sur les précédentes sont difficiles à analyser expérimentalement à cause des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la milliseconde et du millimètre. Il est donc nécessaire de faire appel à un outil numérique complexe pour prendre en compte les divers aspects physiques de cet écrasement. Les travaux menés ont eu tous pour objectif d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes dynamiques et thermiques qui se produisent à l'échelle de gouttes. Notre travail fait partie de l’ensemble de ces travaux.

On a abordé dans le premier chapitre, après un bref rappel des différentes techniques de projection thermique, nous avons décrit ce qu’est le procédé de la projection par plasma d’arc soufflé. Ceci nous a conduit à examiner les principaux phénomènes qui régissent la formation du jet de plasma, le processus de traitement de la poudre dans l’écoulement et la construction du dépôt par accumulation de lamelles obtenues par l’impact de gouttelettes de matière fondues, de leur écrasement et de leur solidification sur le substrat.

Le deuxième chapitre fait le point sur le modèle le plus souvent employé pour simuler l’impact de gouttes sur un substrat solide et la résolution numérique des équations correspondantes, qui a servi de base pour bien choisir les étapes de la procédure numérique utilisée pour notre simulation.

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

- ✓ L’état de la goutte selon qu’elle soit normale ou creuse joue un rôle important sur la morphologie de la lamelle.
- ✓ L’impacte d’un goutte creuse influence sur l’étalement et engendre l’apparition de rebonds.
- ✓ Les températures du substrat et de la goutte sont inversement proportionnelles à cause du transfert de chaleur.

- ✓ La présence de matière dans la gouttelette d'aluminium joue un rôle sur l'étalement de la lamelle et nous constatons un meilleur étalement pour le cas d'une particule pleine.
- ✓ le modèle de transfert thermique utilise a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retarde .
- ✓ A température d'ire T=600°C et diamètre de creuse D=75% la goutte d'aluminium clapisse.
- ✓ A température de substrat T=600°C et diamètre de creuse D=50% et D=75% la goutte d'aluminium clapisse.