REPUBLIQUE **A**LGERIENNE **D**EMOCRATIQUE **E**T **P**OPULAIRE

Ministère **D**e **L**'enseignement **S**upérieur **E**t **D**e **L**a **R**echerche

Scientifique

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la matière

Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master

En Génie mécanique

Option: Energétique et thermique des systèmes

THEME :

L'étude de l'effet de la présence des pics et des creux surfacique de substrat sur le processus de l'étalement de particule lors de formation de dépôt d'aluminium

Présenté par :

Dahmani Mohammed

Zitouni Boumedienne

Dirigé par :

Dr :Zirari Mounir

Promotion : 2014 - 2015

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ***mes très chers parents surtout ma mère qui M'ont aidé et encouragé durant toutes mes études.***

mes chers frères et chères sœurs.

toutes les familles ZITOUNI, DAHMANI, et ainsi que tous proches.

tous mes amis de l'université de Médéa. Surtouts spécialité génie mécanique.

REMERCIEMENTS

Nous remercions notre dieu tout puissant « **ALLAH »** de nous avoir permis et aider à accomplir ce travail en nous assurant l'attente de notre objectif et arriver à notre but.

Nous tenons à remercier particulièrement monsieur **ZIRARI MOUNIR** notre promoteur et co-promoteur **TAHAR SOUAD** pour leurs conseils, leur assistance, leur suivi et leur soutient pour mener à tenir nos différents travaux de notre mémoire de fin d'étude.

Nous témoignons de notre gratitude à l'ensemble des enseignants de l'université Dr. YAHIA FARES de Médéa, et particulièrement les enseignants de département de génie-mécanique.

Merci à tous ceux qui, à un moment ou un autre, nous ont apporté leur savoir faire

Tous nos remerciements vont à messieurs les membres du jury qui nous ont honorés par leur présence et leur sens du savoir.

Résumé :

Dans le sens de continuité de travail et de recherche pour modéliser les phénomènes de plasma et le comportement mécanique et thermique des particules fondues et semi fondu en cas de collision avec des cors solides de diverses natures en propose ce sujet intitulé « l'étude de l'effet de la présence des pics et des creux surfacique de substrat sur le processus de l'étalement de particule lors de formation de dépôt d'aluminium » , la projection plasma est une des techniques de traitement de surface qui consiste à injecter des particules métalliques ou céramiques (diamètre de 10 à 100 µm) dans un jet plasma où elles reçoivent une quantité de mouvement et de chaleur ,elles arrivent au substrat en état fondu ou semi fondu avec des vitesses qui peuvent être supersoniques .Elles s'étalent et se solidifient rapidement en lamelles orientées parallèlement au substrat dont l'empilement forme un dépôt qui se caractérise par une structure lamellaire hétérogène .Ce dépôt a pour fonction la protection de la surface des matériaux sensibles d'un voisinage mécanique ou thermique éprouvant .Les propriétés du dépôt obtenu sont fortement liées au contact lamelle-substrat ou lamelle-lamelle .L'étude de l'écrasement dune particule fondue sur un substrat est une étape nécessaire pour une meilleure compréhension des dépôt obtenus par projection plasma afin d'optimiser leur qualité et leur performance

Mots clés : Dépôt, lamelle, coin, impact, substrat, VOF, changement de phase, chaleur spécifique équivalente, éléments finie, simulation , numérique ,ANSYS.

ملخص :

الرش بالبلازما هي واحدة من تقنيات المعالجة السطحية، التي تتضمن حقن الجزيئات المعدنية او السيراميك (القطر 10-100 ميكرو متر) في تدفق البلازما بحيث تتلقى هذه الجزيئات الزخم والحرارة، وتصل الى الركيزة منصهرة أو شبه منصهرة مع سرعة قد تكون اسرع من سرعة الصوت، والتي تنتشر وتتصلب على مستوى الركيزة مشكلة كومة ودائع .تتميز ببنية رقائق متجانسة . هذه الودائع لديها وظيفة حماية أسطح المواد الحساسة للخصائص الميكانيكية أو الحرارية . الودائع التي تم الحصول عليها مرتبطة ارتباطا وثيقا بجهة الاتصال الركيزة مع الشريحة او الشريحة-الشريحة

دراسة تحطم الجسيمات المنصهرة على الركيزة خطوة ضرورية لفهم الودائع المتحصل عليها عن طريق الرش بالبلازما لتحسين الجودة والاداء ، في هذا الاطار قمنا بدراسة تاثير وجود النتوء و القعور السطحية على عملية انتشارجزيئات الالمنيوم و تشكلها على الركيزة

الكلمات المفتاحية : وديعة ، شريحة، ركن، تصادم ، الركيزة ، تغيير في الحالة ، الحرارة النوعية المعادلة

.VOF ,ANSYS، العناصر المحددة ،دراسة، رقمية ،

SUMMARY:

In the sense of continuity of work and research to model the plasma phenomena and the mechanical and thermal behavior of molten particles and semi melted in a collision with solid horns of various kinds in this proposed topic "the study of The effect of the presence of peaks and hollow substrate surface on the process of spreading particle when aluminum deposit formation "plasma spraying is one of the surface treatment techniques of injecting metal particles or ceramic (diameter 10 to 100 microns) into a plasma jet where they receive a momentum and heat, they arrive at the substrate in molten or semi-molten state with speeds that may be supersonic .They spread and solidify quickly into strips aligned parallel to the substrate which the stack forms a deposit which is characterized by a lamellar heterogeneous structure .This deposit has the function of protecting the surface of sensitive material experiencing a mechanical or thermal neighborhood.

Keywords:deposit**,**corner, impact, substrate, VOF, phase change, equivalent specific heat, finite elements, simulation, digital, ANSYS.

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

I-1 Principe de la projection thermique …….3

I-2 Techniques de projection thermique……...3

I.2.1. La projection par flamme ……...4

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

I.2.1.2 La projection flamme –fil ……6

I.2.1.3 La projection supersonique par combustion……7

Le procédé HVOF

Le procédé HVAF

I.2.1.4 Le canon à détonation……..8

I.2.2. La projection par arc électrique……..9

I.2.2.1 La projection arc-fil……..9

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

I.2.3 La projection plasma……..……11

- Plasma
- Principe de la projection plasma

SOMMAIRE

I.2.3.1. Fonctionnement de la torche à plasma d'arc ……12

- Torche à arc transféré
- Torche à arc soufflé

I.2.3.1.1 Amorçage de l'arc……..14

I.2.3.1.2 Le gaz plasmagène…….14

I.2.3.1.3. L'injection des gaz plasmagènes ……..16

I.2.3.2 Formation du jet plasma ……..17

I.2.3.3. Ecoulement du jet plasma ……..……18

I.3. Modélisation de l'écoulement ……..19

I.3.1. Température de l'écoulement…….19

I.3.2. Densité et pression de l'écoulement ……..20

I.3.3. Vitesse de l'écoulement …….……21

I.4. Traitement des particules dans le jet plasma ……22

I.4.1 Injection de la poudre …….22

I.5 La préparation du substrat avant le revêtement……..23

I.5.1 CONSTRUCTION DES DEPOTS …….24

1.5.2 Ecrasement des particules sur le substrat……25

- l'impact
- l'étalement

I.6. La solidification des lamelles ……..……26

I.6.1 FORMATION DU DEPOT …….. ……... …...27

I.6.2 Solidification et refroidissement des particules ……..……..29

I.9. Conclusion

SOMMAIRE

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

Introduction ……31

II.2. Modèle dynamique ……..31

II.2.1. Equation de continuité ……31

II.2.2. Equation de quantité de mouvement ……32

II.2.3. Equation de conservation d'énergie ……33

II.3.modèle thermique ……..33

II.3.1.Transfert de chaleur avec changement de phase ……..……34

II.3.1.1.Méthode a grille mobile ……..34

II.3.1.2.Méthode a grille fixe ……...……35

II.3.1.3.Méthode d'enthalpie ……35

II.3.1.4.Méthode de la chaleur spécifique équivalente……..……37

II.3.2.Modèle thermique utilisé ……...……38

II.5.Conclusion ……...……..39

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

Introduction…….…….……..40

III.1. Méthodes de discrétisation ……..……..40

III.2.1 Méthode des différences finies. ……40

III.2.2Méthode des volumes finis 40

III.2.3Méthode des éléments finis……41

III.2.3.1 Présentation de la méthode……... 41

III.2.3.2 Forme générale des équations du système ……42

III.3. Méthodes de discrétisations ……45

SOMMAIRE

III.3.1 Maillage élément finis…….. 45

III.3.2 Calcul d'interfaces …….....46

III.3.3 Evolution de la Surface Libre ……..46

III.3.3.1 Approche Lagrangienne…….46

III.3.3.1 Approche Eulérienne……..47

III.3.3.1.1 Les méthodes de suivi de front……48

III.3.3.1.2 Les méthodes de suivi de volume ……...49

III.4. La Méthode VOF CIAM ……50

III.5. Conclusion ……..51

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction …….52

IV.2. Logiciel d'analyse d'ANSYS……52

IV.3. Matériaux utilisés ……53

IV.3.1. L'aluminium ……54

IV.3.2. le tableau Suivent récapitule les prospérité des mâtereaux utilisé dans la simulation..55

IV.4. Identification……56

IV.5. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus …….57

IV.6. Description du domaine d'application ……59

IV.7 Pour le diametre des pics et creux D=1mm et E=0.2mm……..60

IV.8 Pour le diametre des pics et creux D=0.4mm et E=0.2 mm…….64

IV.9 Pour le diametre des pics et creux D=1mm et E=0.5 mm……68

IV.10 Pour le diametre des pics et creux D=0.4mm et E=0.5 mm……...72

IV.10 Comparaison entre les deux cas de diametre……76

- pour la température de 1er cas…….....76

SOMMAIRE

- pour la température de 2eme cas…….77
- pour la pression de 1er cas……77
- pour la pression de 2eme cas……..78
- pour les facteurs d'étalement de 1er cas……79
- pour les facteurs d'étalement de 2eme cas……..80

Conclusion……81

CONCLUSION GENERAL……82

REFERENCES……..83

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Principe de la projection thermique

Figure I-2 : Caractéristiques de projection thermique

Figure I-3 : Projection a la flamme

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

Figure I-5 : Schéma d'un pistolet flamme fil

Figure I-6 : schéma du procédé HVOV

Figure I-7 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation

Figure I-8 : schéma du procédé arc fil

Figure I-7 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation

Figure I-8 : schéma du procédé arc fil

Figure I-9 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.

Figure I.10 : Principe de fonctionnement de projection plasma

Figure I-11 : Torche plasma à arc transféré

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

Figure I–13 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes.

Figure I–14 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes

Figure I–15 : Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes

Figure I–16 : schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma

Figure I–17 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant :

Figure I–18 : Évolution de la température dans la tuyère (Gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin)

Figure I–19 : Évolution de la pression dans la tuyère (Gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin)

Figure I–20 : Iso contours de la vitesse du gaz (azote et hélium) dans la tuyère

Figure I–21 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)

Figure I–22: Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface

Figure I–23 : Mécanismes d'étalement des lamelles,

Figure I-24 : L'écrasement, des particules sur des aspérités

Figure I–25 : Processus de formation du dépôt

Figure II.1 : évolution de l'enthalpie en fonction de la température

Figure III.2 : Approche Lagrangienne et Approche Eulérienne

Figure. **III.3 :** Différentes méthodes de suivi de front

Figure. **III.4 :** Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque

Figure. III.5 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique

Figure IV–3 : représentation spatiale de la dynamique d'étalement dans les même conditions

Figure IV- 4 : facteurs d'étalement**.**

Figure IV– 5 : schéma de principe du domaine informatique.

Figure IV-6-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

Figure IV-6-2 : profiles de température dans le temps poure qutres positions dans substrat

Figure IV-6-3 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

Figure IV-6-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

Figure IV-7-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

Figure IV-7-2 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans substrat

Figure IV-7-3 : la variation de la pression d'impact pour trois points

L'interface particule / substrat

Figure IV-7-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

Figure IV-8-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

Figure IV-8-2 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans

substrat

Figure IV-8-3 : la variation de la pression d'impact pour trois points

L'interface particule / substrat

Figure IV-8-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

Figure IV-9-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

Figure IV-9-2 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans

substrat

Figure IV-9-3 : la variation de la pression d'impact pour trois points

L'interface particule / substrat

Figure IV-9-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

Figure IV-10 : Comparaison entre les profils de température dans chaque (R) pour E=0.2mm

Figure IV-11 : Comparaison entre les profils de température dans chaque (R) pour E=0.5mm

Figure IV-12 : Comparaison entre les profils de pression dans chaque (R) pour E=0.2mm

Figure IV-13 : Comparaison entre les profils de pression dans chaque (R) pour E=0.5mm

Figure IV.14 : Comparaison entre les facteurs d'étalement dans chaque (R) pour E=0.2mm

Figure IV.15 : Comparaison entre les facteurs d'étalement dans chaque (R) pour E=0.5mm

LISTE DES TABLEAUX :

- **Tableau I.1 :** Caractéristiques des revêtements obtenues par différents procédés...**13**
- **Tableau 1-2 :** Rappel de quelques nombres caractéristiques de l'écoulement plasma et des spats (sans dimension) ……**27**
- **Tableau III.1 :** Tableau de Représentation d'équation de transport. ……...**43**
- **Tableau IV -1 :** propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13……**55**

Introduction Générale

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 superieur 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…). La morphologie finale de l'impact dépend du diamètre de gouttelette, de la température, de la vitesse, et du l'état fondue [1.2]. Les études expérimentales se sont concentrées sur l'impact des gouttelettes fondues sur un substrat lisse ou rugueux. Escure et autres [3] étudient l'impact des gouttelettes liquides d'alumine sur différents substrats. Le paramètre de Sommerfeld a été employé pour décrire le comportement d'impact, tel que le dépôt, et l'éclaboussement.

Ahmed et Rangel [4] ont étudié numériquement l'impact et la solidification d'une gouttelette en aluminium sur les substrats rugueux, en utilisant un modèle axisymétrique bidimensionnel. Leurs résultats prouvent que l'impact de gouttelette sur un substrat rugueux est presque toujours accompagné par l'éclaboussement. Cependant, le degré d'éclaboussement diminue avec l'augmentation de la rugosité.

Fukanuma [5] a présenté une formule qui décrit le processus d'aplatissement d'une gouttelette sur une surface approximative, et a conclu que le rapport d'aplatissement diminué dans le temps avec l'augmentation de la rugosité.

Introduction Générale

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'effet de la présence des pics et des creux surfacique de substrat sur le processus de l'étalement de particule lors de formation des dépôts d'aluminium.

Le travail est présenté en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre contient une définition des paramètres influençant sur la formation des dépôts de l'injection des particules dans le jet jusqu'à la formation de la lamelle c'est à dire la projection thermique est ces différentes procédés, l'écoulement du jet plasma ainsi que l'impact, l'étalement et la solidification de la lamelle.
- ✓ Dans Le deuxième chapitre on propose les différentes méthodes et modèle mathématique utilisées pour expliquer le physique des écoulements diphasique des fluides non miscible. Donc la présentation des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié.
- ✓ Le troisième chapitre est dédié à la résolution numérique et les méthodes de calcul.
- ✓ Dans le quatrième chapitre on va présenter les résultats de simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact et la solidification des gouttes sur un substrat rugueux.

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

I-1 Principe de la projection thermique

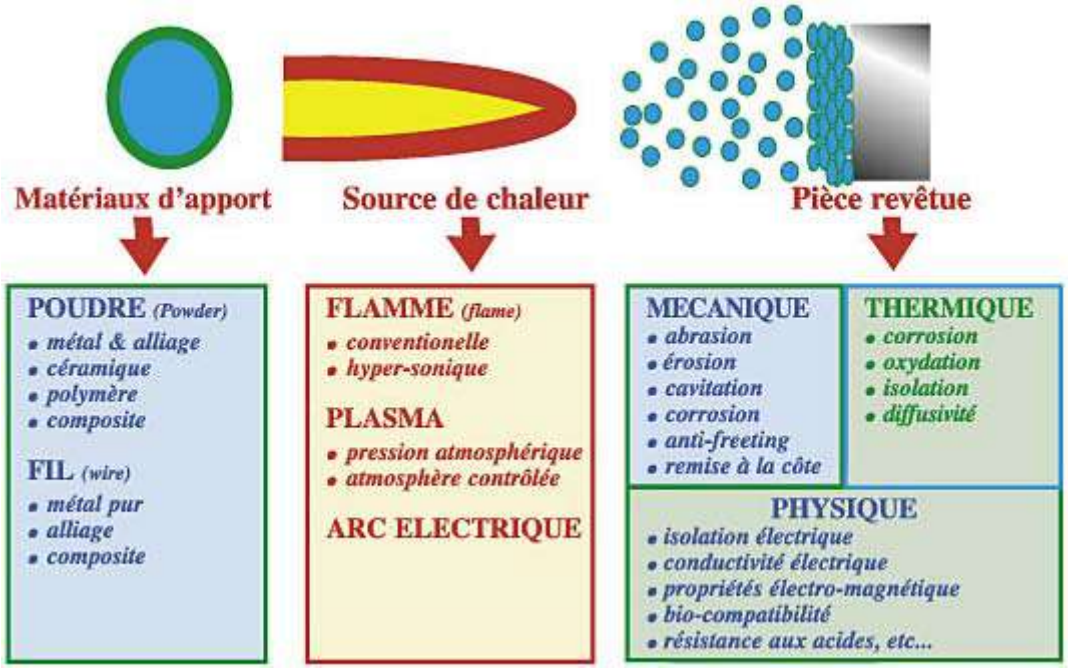


Figure I-1 : Principe de la projection thermique [6]

I-2 Techniques de projection thermique

La technique de projection thermique consiste en l'introduction de particules dans un flux de gaz énergétique pour être fondues ou portées à l'état plastique et accélérées vers un substrat sur lequel elles s'écrasent et se solidifient sous forme des lamelles. L'empilement des particules écrasées sur le substrat constitue alors le revêtement qui présente une structure irrégulière pouvant contenir des oxydes, des porosités et des fissures. Suivant le procédé de projection thermique, deux paramètres peuvent caractériser le système. Le premier est l'énergie thermique, le second est l'énergie cinétique [7]. La figure 1.2 présente alors les caractéristiques typiques des différents procédés de projection thermique.

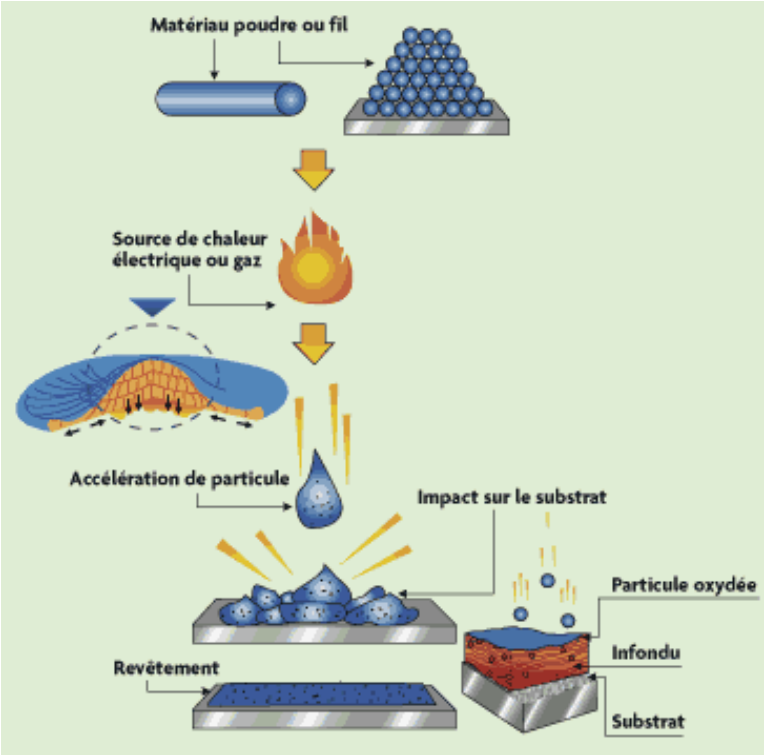


Figure I-2 : Caractéristiques de projection thermique [6]

I.2.1. La projection par flamme

Dan le cas où le matériau d'apport est sous forme de fil, la seule fonction de flamme est de fondre le matériau, ce dernier étant projeté par de l'air comprimé.

Dans le procédé de projection a la flamme avec poudre, les particules sont injectées dan la torche, puis fondues et projetées par la flamme.

Le principal avantage de cette technique est la grande variété des poudres utilisées offrant ainsi un large choix de revêtements. Néanmoins, ce procédé est limité pur les matériaux a haut point de fusion en raison des faibles vitesses (40m/s) et températures des particules en vol. Les revêtements sont poreux et peu adhérents au substrat [8].

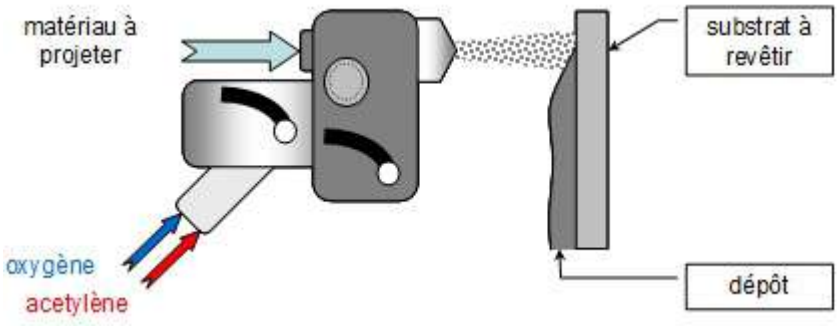


Figure I-3 : Projection a la flamme [8]

I.2.1.1 La projection flamme –poudre

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure suivante. L'utilisation de débit-litres pour contrôler les débits de gaz est un facteur important. Un des principaux avantages des pistolet de projection flamme poudre par rapport au pistolet de projection flamme fil est lié à la plus grande variété de revêtements disponibles due au fait que la plupart des matériaux sont disponibles sous forme de poudres. Le procédé de projection flamme poudre est seulement limité par les matériaux qui ont une température de fusion supérieure à celle de la flamme ou alors dans le cas où le matériau projeté se décompose à la chaleur. Des revêtements de polymères (PTFE, PA12, ...) peuvent aussi être réalisés par projection flamme [6].

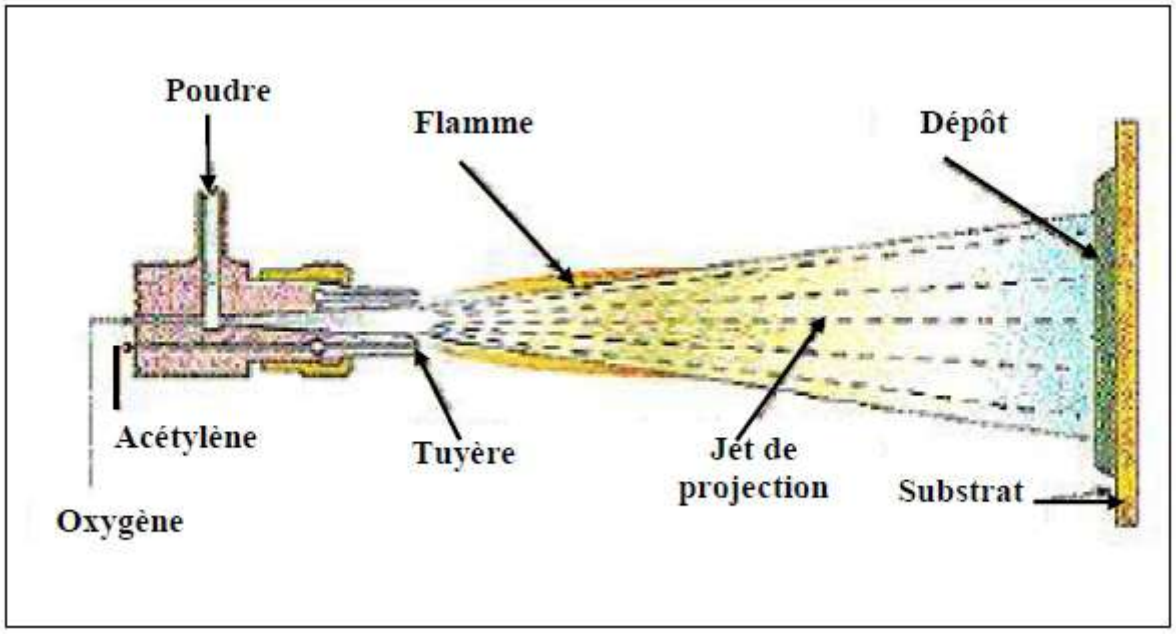


Figure I-4 *:* Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre [9].

I.2.1.2 La projection flamme –fil

Dans cette technique (fig. I.5) le matériau d'apport est introduit dans le centre de la flamme sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre et qui ne sert qu'à faire fondre le matériau. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, celui-ci sert à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée (v=150m/s), la température du bout de fil peut atteindre 0.95 fois la température de la flamme ce qui permet la projection des céramiques, à des taux horaires de dépôts qui varient de 1 à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, les propriétés de dépôts désirées et les diamètres de fil ou de baguettes utilisés [9,10].

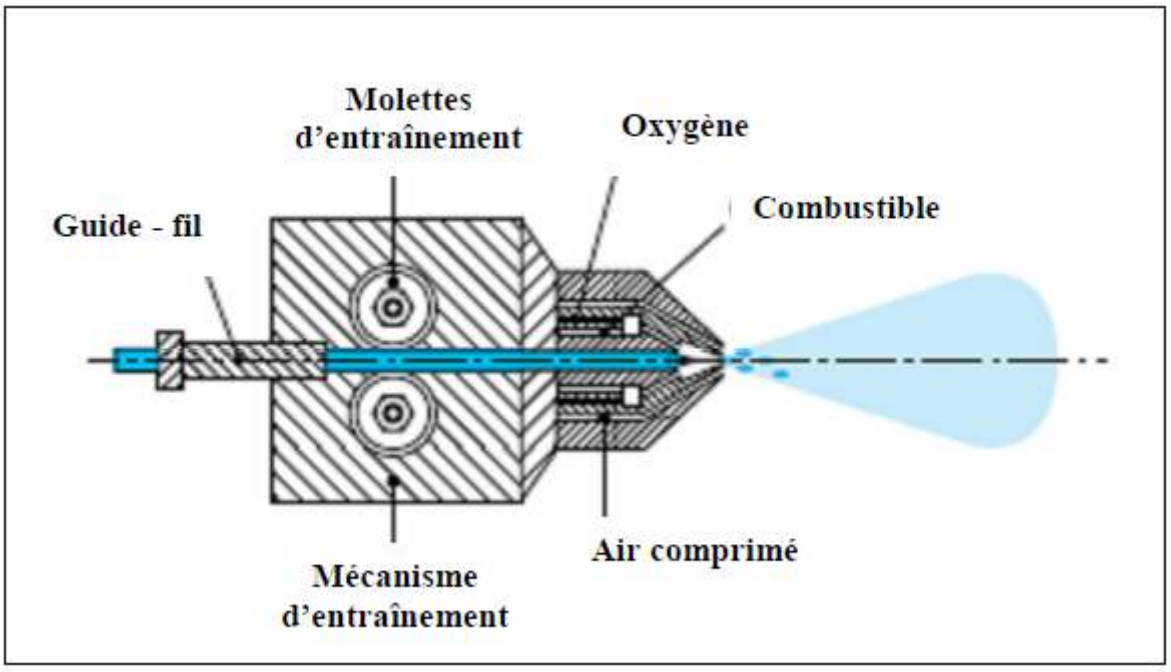


Figure I-5: Schéma d'un pistolet flamme fil [10]

I.2.1.3 La projection supersonique par combustion

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 m/s) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée (0,5 à 1 M Pa) [11].

- **Le procédé HVOF**

Le procédé HVOF utilise de l'oxygène et un combustible gazeux. Par combustion, les gaz sont transformés en énergie cinétique. De la poudre est alors introduite dans la torche et au moyen d'une buse convergente/divergente cette poudre fondue ou semi fondu est accélérée à une vitesse supersonique.

Les particules ainsi projetées sur le substrat sont aplaties et forment lors de leur refroidissement et solidification le revêtement. La vitesse élevée des particules, leur réchauffement uniforme et un temps de passage court dans la flamme contribue à la formation d'un revêtement ayant une densité élevée et une excellente adhérence [12].

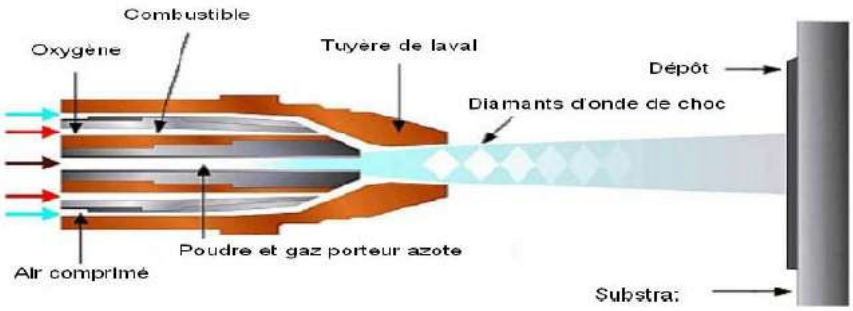


Figure I-6 : schéma du procédé HVOV

- **Le procédé HVAF** : High Velocity Air-fuel Flame, la combustion est assurée par un mélange kérosène-air comprimé [11].

I.2.1.4 Le canon à détonation

Dans ce procédé le matériau d'apport, sous forme de poudre, est introduit dans un tube fermé à une extrémité appelé canon à détonation (fig. I.7), en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 6 à 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée est éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée et qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 M Pa. Le régime de projection est donc discontinu et entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Les dépôts réalisés avec ce procédé possèdent des caractéristiques remarquables telles que la porosité qui est inférieur à 1% et une adhérence qui est souvent supérieur à 80 MPa, à des taux horaires de dépôts de l'ordre de 3 à 5 kg/h [9,10].

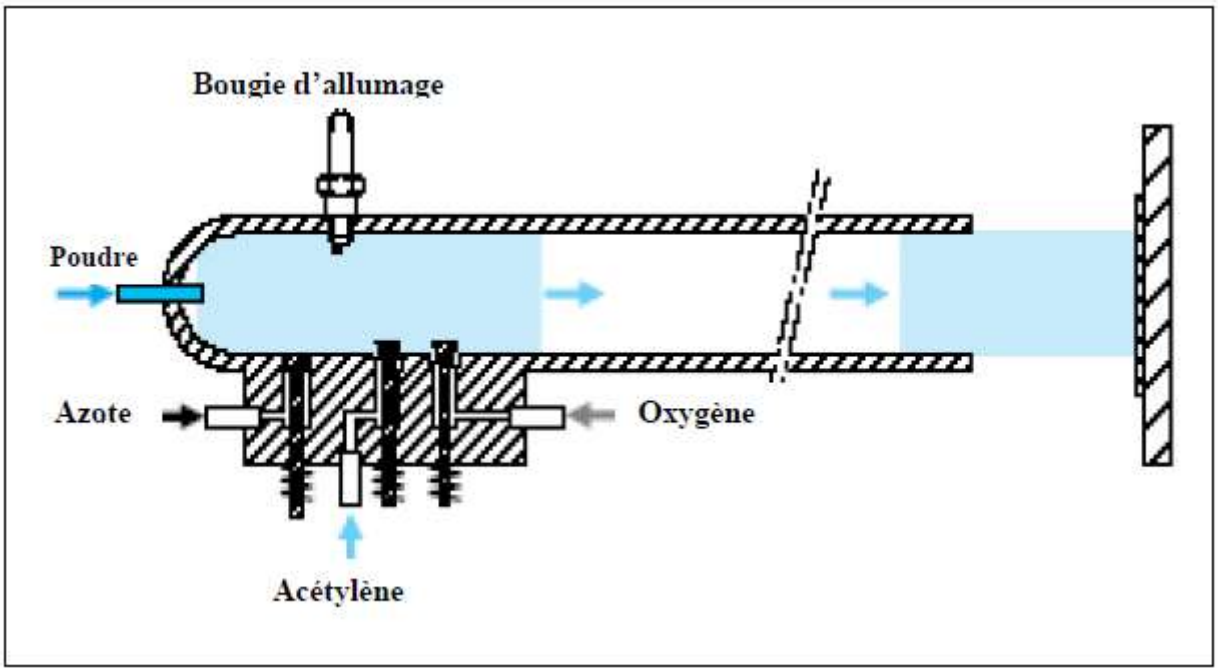


Figure I-7 *:* Schéma de fonctionnement du canon à détonation

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

Cette technique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux électrodes sous formes de fils ductiles consommables comme source de chaleur pour fondre le matériau (fig. I.8). Celui-ci, réduit à l'état de gouttelettes, est pulvérisé sur le substrat par un jet d'air comprimé. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A Ce procédé de projection est simple et économique mais limité aux matériaux conducteurs et tréfilables ; le récent développement des fils fourrés céramiques tend à y remédier [9, 13].

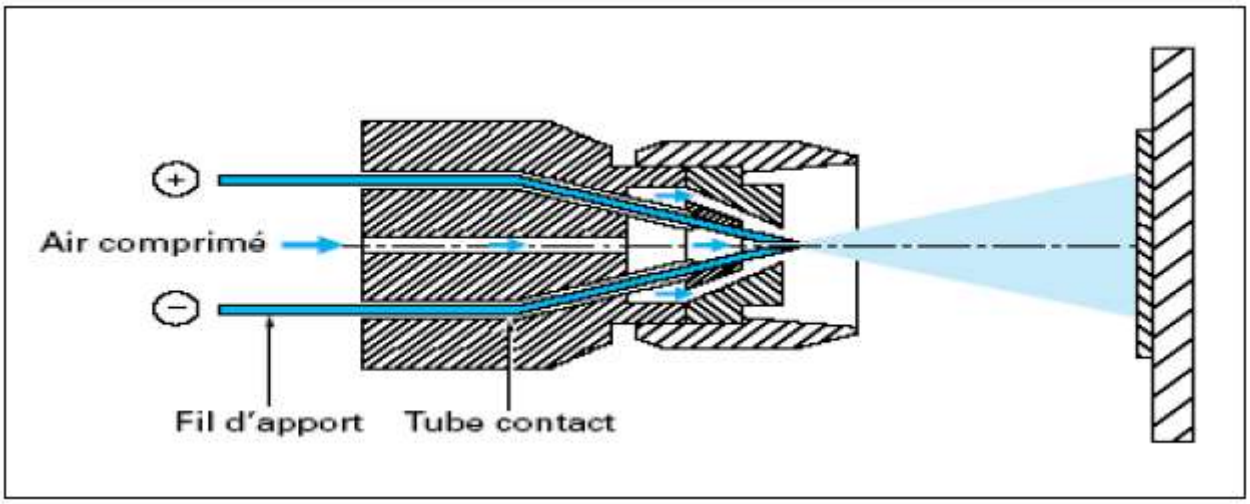


Figure I-8 : schéma du procédé arc fil

I.2.2.2 La projection par plasma d'arc soufflé

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

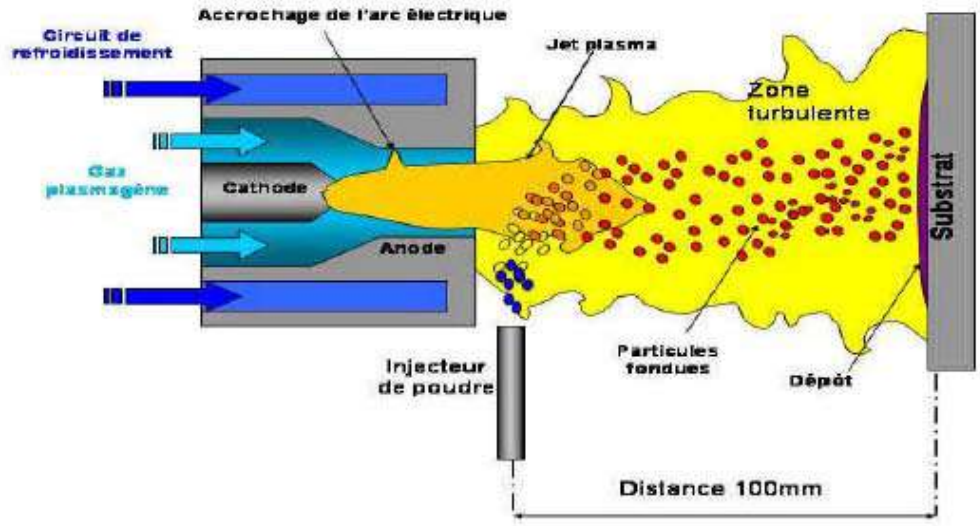


Figure I-9 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.

I.2.3 La projection plasma

Ce procédé utilise des matériaux métalliques, céramiques ou cermets sous forme de poudre avec des particules de taille inférieure à 100 µm. Ces particules sont déposées dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. La source de chaleur est un jet de plasma produit par arc électrique ou une décharge radiofréquence [14].

Plasma

Le plasma est considéré comme 4ème état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué d'une collection des molécules, atomes, ions et électrons dont l'ensemble est électriquement neutre [10 ,15].

La génération de plasma nécessite l'emploi de trois éléments fondamentaux :

- Une source de puissance (générateur à courant continu)
- Une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension)
- Un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma

Principe de la projection plasma

C'est cette technique qui a été utilisée pour déposer nos échantillons, elle utilise comme source thermique un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères) éclatant entre deux électrodes, dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général (fig. I.10). Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée de 1000 à 1500 m /s [16]. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur, généralement de l'argon. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat.

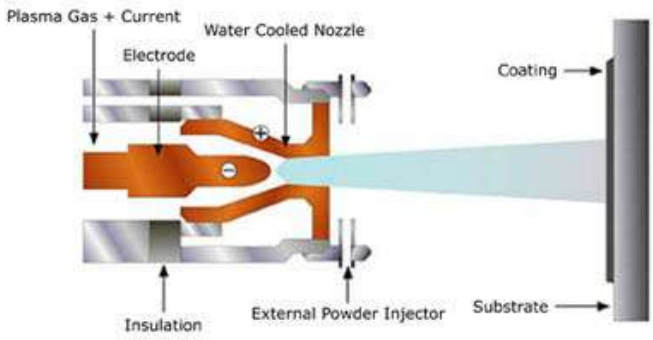


Figure I.10 : Principe de fonctionnement de projection plasma

I.2.3.1. 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 [17].

- **Torche à arc transféré**

L'arc jaillit entre une électrode interne et un corps conducteur, généralement le substrat ;

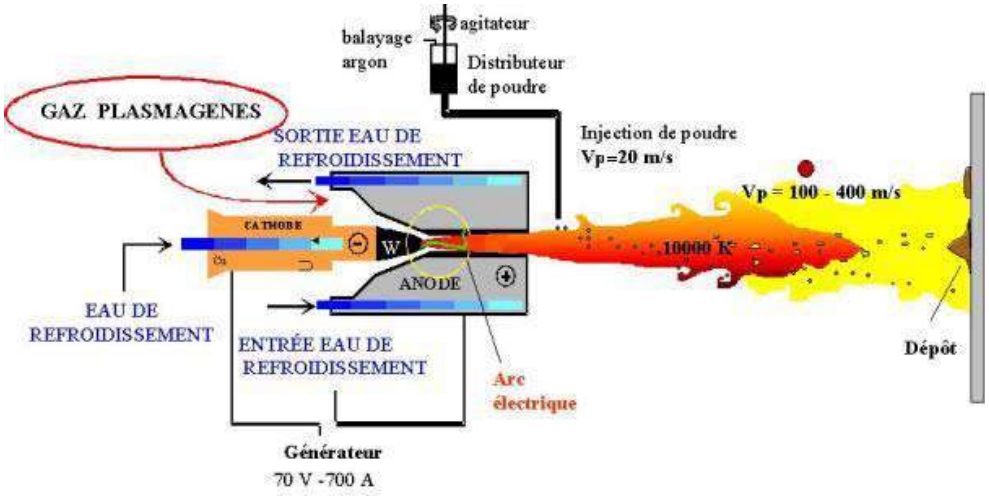


Figure I-11: Torche plasma à arc transféré

❖ **Torche à arc soufflé :**

Dans la plupart des cas, la torche à plasma constituée d'une tuyère anode et d'une pointe cathode, fonctionne dans l'air à la pression atmosphérique. Ce procédé est appelé APS (Atmosphérique Plasma spraying). La différence de potentiel aux bornes de la cathode et de l'anode provoque l'éclatement d'un arc entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode. Cet arc est ensuite entretenu par le courant de forte intensité. La partie du gaz chauffée par effet Joule forme un volume de gaz ionisée ou plasma appelé colonne d'arc. Cette colonne d'arc quitte la torche en formant un dard (12) ou cœur du jet [18].

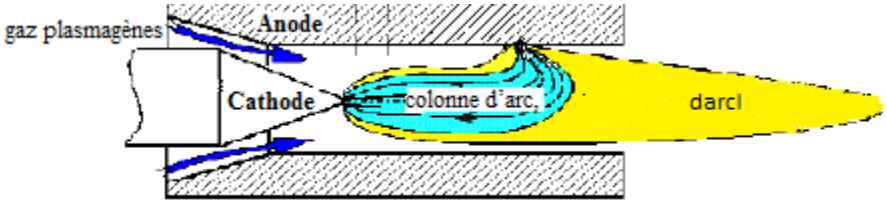


Figure I-12 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma.

Type de projection	Flamme	Arc	Plasma	HVOF
Porosité du dépôt (en %)	10 à 20	5 à 20	1 à 10	<0.5
Adhérence type du dépôt (MPa)	15	40	40	>60
Dureté WC-Co (12%)	600 - 700		850 - 1150	>1200
Avantage	peu coûteux	peu coûteux vitesse dépôt élevée	outil polyvalent	faible porosité
Limitation	Normalement porosité élevée adhérence faible échauffement du substrat possibilités limitées	matière déposée conductrice d'électricité. forte porosité	relativement coûteux	pas de possibilté de projeter des oxides
Matériaux d'apports	métaux et certaines céramiques	fils métalliques		

Tableau I.1 Caractéristiques des revêtements obtenues par différents procédés

I.2.3.1.1 Amorçage de l'arc

Un plasma peut-être généré en faisant passer dans un gaz plasmagène un arc électrique entre l'extrémité conique d'une cathode en tungstène théorie (2% en thorine, ce qui abaisse le potentiel d'extraction du métal de 4,5 à 2,5eV) de type tige et le revêtement de tungstène de l'anode en cuivre. L'initiation du transport de charges entre les deux électrodes dans un gaz à température ambiante (considéré comme un bon diélectrique) nécessite l'application d'une surtension (6 à 10kV) sous une fréquence de quelques MHz qui doit être supérieure à Une valeur critique appelée tension de claquage pour rendre ce gaz conducteur. De l'argon est généralement utilisé pour cette étape d'amorçage de l'arc électrique, ce gaz monoatomique étant plus facile à ioniser que les autres gaz plasmagènes et la tension de démarrage plus faible, limitant ainsi le courant de démarrage. Le passage du courant s'effectue alors au travers du gaz ionisé. [19].

I.2.3.1.2 Le gaz plasmagène :

Le gaz plasmagène est généralement constitué de deux gaz, le premier est un gaz lourd qui donne sa quantité de mouvement aux particules injectées. Le choix est alors limité à l'argon (40 g/mole) ou à l'azote moléculaire

(28 g/mole). Les torches utilisées (développée au laboratoire ou industrielle comme la PTF4 de Sulzer Metco) étant conçues pour travailler à l'argon comme gaz primaire nous ne considérerons que ce gaz. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent la tension « utile » qui va être disponible dans le jet de plasma est $\int_0^1 E(\mathrm{z})$

où lest la longueur de la colonne d'arc. Le champ électrique dépend fortement des pertes de la colonne d'arc. Plus celles-ci augmentent plus l'arc se constricte pour les limiter, accroissant par ce biais le champ électrique E. Les pertes latérales dépendent principalement d'une part du diamètre interne de la tuyère (plus il diminue plus elles augmentent, pour un courant donné) et d'autre part de la conductivité thermique du gaz plasmagène. Cette dernière est de loin la plus faible de toutes avec 'argon'[20].

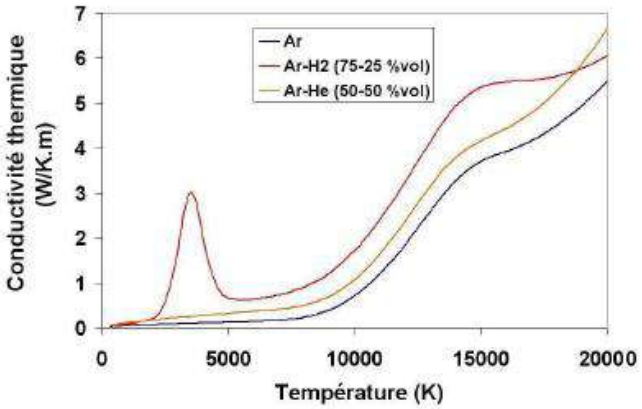


Figure I–13 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes. [20]

Pour ce dernier, cela implique des champs dans la colonne d'arc de quelques centaines de V/m limitant ainsi la tension utile à 10-15 V pour une tuyère de 6 ou 7 mm de diamètre interne. C'est pourquoi on utilise des mélanges Ar-H2 ou Ar-He, chacun ayant des avantages et des inconvénients. La tension moyenne dans l'arc est alors, suivant les conditions de fonctionnement, d'une trentaine de volts pour Ar pur, une quarantaine de volts .Pour Ar-He et une bonne soixantaine pour Ar-H2. Cependant dans ce dernier cas, le courant est limité à environ 600-650 A car la constriction au niveau pied cathodique par l'hydrogène entraîne l'usure plus rapide de la cathode au-delà de ce courant. Par contre avec l'Ar ou l'Ar-He on peut atteindre 900 A voire 1000 A. De plus l'He accroît la viscosité du mélange au-delà de 10000 K (Figure I.14) ce qui permet, pour des vitesses d'écoulement proches, d'obtenir des jets de plasma un peu plus larges et un peu plus longs avec ce mélange.

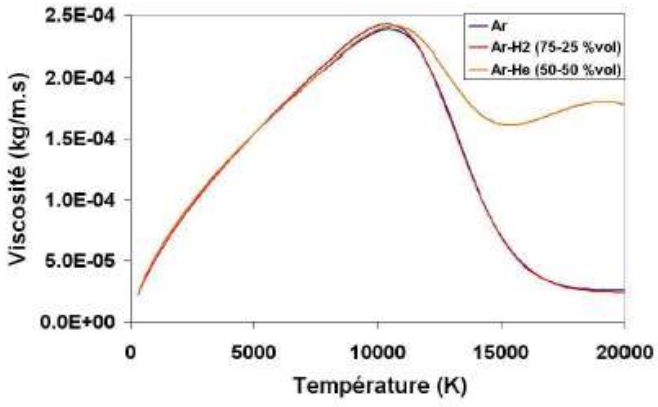


Figure I–14 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [20].

L'enthalpie, h, des gaz plasmagènes nous apporte également des informations intéressantes sur le comportement des jets de plasma. Rappelons que h est l'énergie dissipée dans le plasma divisée par le débit massique de gaz : $\frac{\mathbf{P-Q\ eau}}{\mathbf{m}}$ **(j/kg)** .Comme nous pouvons le voir sur la (Figure I–15) elle est d'autant plus élevée pour une température donnée que l'on passe de l'argon pur, à l'Ar-He puis à l'Ar-H2. Mais ces courbes montrent également un point important : au-delà de 10000 K, l'augmentation du degré d'ionisation avec la température entraîne une variation importante d'enthalpie et pour accroître la température de 2000 K il faut pratiquement doubler l'enthalpie.

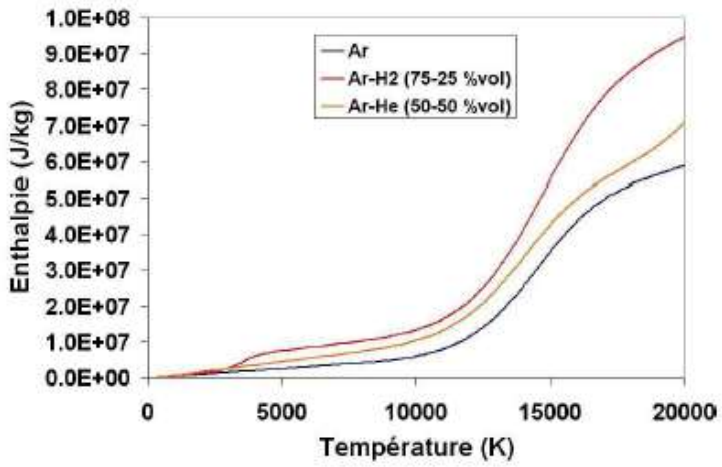


Figure I–15 : Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [20]

I.2.3.1.3. L'injection des gaz plasmagènes

Les électrons émis par la cathode sont accélérés par le champ électrique et créent le plasma dont la rapide expansion pompe une partie des gaz plasmagènes. L'injection des gaz plasmagènes peut être :

- **axiale** : parallèle à l'axe de la cathode,
- **radiale :** normale à l'axe de la cathode,
- **ou en vortex :** gaz injectés de manière radiale avec une composante de rotation.

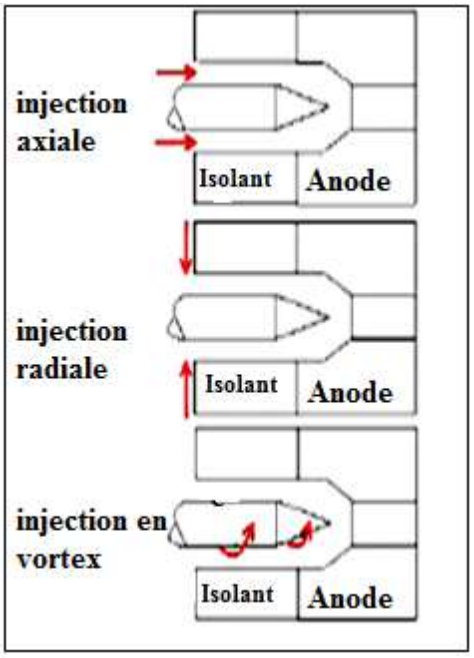


Figure I–16 : schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma

I.2.3.2 Formation du jet plasma

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

- une température à cœur élevée : de 5000 à 14000 K avec une densité de flux thermique
- Pouvant atteindre 1010 W.m-2.
- une vitesse d'écoulement élevée : de 500 à 2500 m/s
- des gradients radiaux importants : jusqu'à 5.105 (ms.-1).m-1 pour la vitesse et 107 K/m Pour la température.
- un mélange gazeux de faible densité : 1/30 à 1/40 de la densité du mélange gazeux à froid[21].

I.2.3.3. Ecoulement du jet plasma :

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

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

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

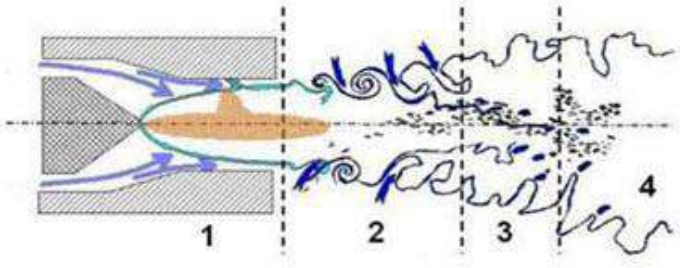


Figure I–17 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant :

- **1** : Ecoulement laminaire
- **2** : Début de développement de turbulence,
- **3** : Ecoulement cisaillé turbulent,
- **4** : Ecoulement pleinement développé.

I.3. Modélisation de l'écoulement

Connaissant le nombre de mach, on peut alors appliquer d'autres équations au cas spécifique de la zone de sortie de tuyère [23].

I.3.1. Température de l'écoulement :

La théorie isentropique unidimensionnelle donne en sortie de tuyère :

$$\frac{T_0}{T_e} = 4.15 \; en \; azote \; et$$

$$\frac{T^0}{T_e} = 9.74 \text{ en hélium}$$

Ici T est la température du gaz au point considéré de la tuyère, T'est la température du gaz

En sortie de tuyère, T0 est la température d'introduction du gaz dans la tuyère.

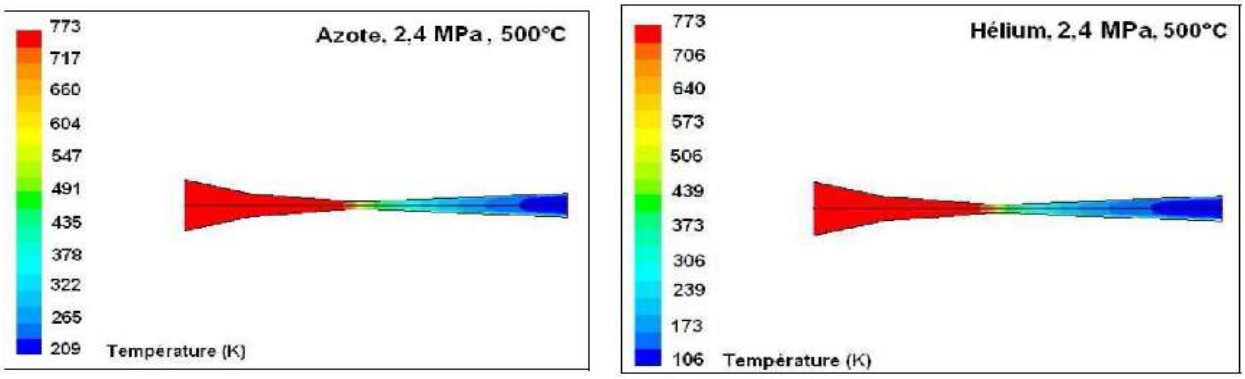


Figure I–18 : Évolution de la température dans la tuyère

(Gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin)

I.3.2. Densité et pression de l'écoulement

La théorie isentropique unidimensionnelle donne en sortie de tuyère :

$$\frac{\rho_0}{\rho_e} = 30.38 \text{ en Hélium}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_e} = 35.31 \text{ en azote}$$

Ici ρ est la densité du gaz au point considéré de la tuyère, est la densité du gaz en sortie de tuyère, est la densité d'introduction du gaz dans la tuyère

Concernant la pression du gaz, en sortie de tuyère, avec la théorie isentropique unidimensionnelle

$$\frac{\rho e}{\rho_t} = 0.013 \text{ en azote}$$

$$\frac{\rho e}{\rho_t} = 0.007 \text{ en Hélium}$$

Ici p est la pression du gaz au point considéré de la tuyère, PE est la pression du gaz en sortie de tuyère, pt est la pression du gaz au col sonique de la tuyère.

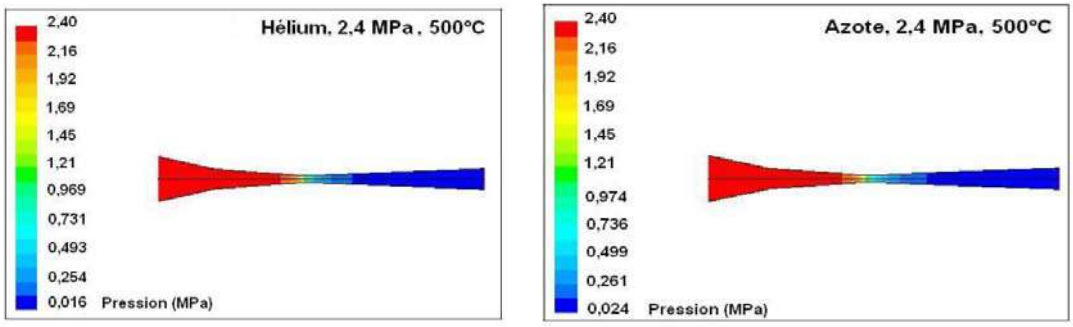


Figure I–19 : Évolution de la pression dans la tuyère

(Gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin)

I.3.3. Vitesse de l'écoulement

L'application de la théorie isentropique unidimensionnelle donne :

$$u_g = 39.72\sqrt{T_0} \text{ avec de l'azote}$$

$$u_g = 39.72\sqrt{T_0} \text{ avec l'hélium}$$

Où M est le nombre de Mach caractéristique de la tuyère, γ est le rapport des chaleurs spécifiques, R la constante spécifique du gaz et T sa température au point considéré.

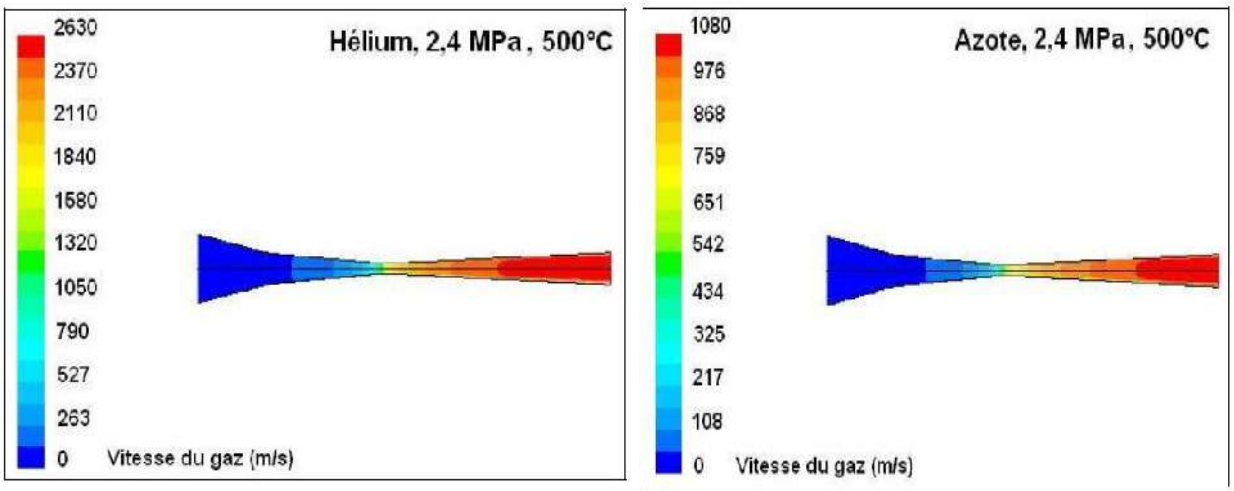


Figure I–20 : Iso contours de la vitesse du gaz (azote et hélium) dans la tuyère

I.4. Traitement des particules dans le jet plasma

Le traitement des particules dans le jet plasma met en jeu l'ensemble des transferts de quantité de mouvement, de masse et de chaleur entre le plasma et les particules. Ces transferts sont fonction des paramètres du plasma (champs de température et de vitesse de l'écoulement, mélange plasmagène, …) et des paramètres des particules ou particules (propriétés thermiques, distribution de taille, morphologie, …) [24].

I.4.1 Injection de la poudre

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

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

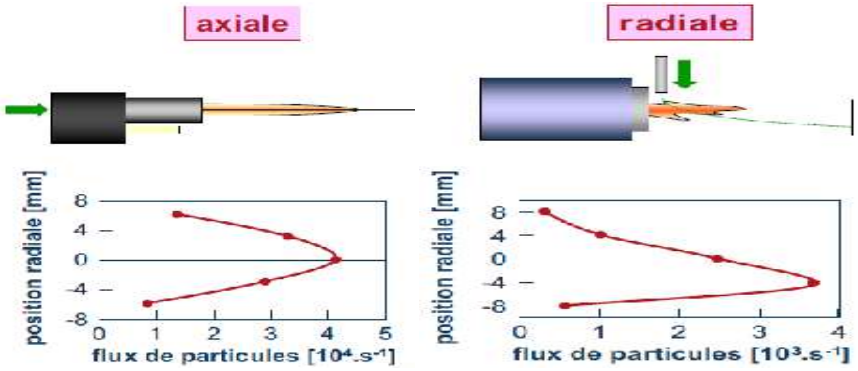


Figure I–21 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)

I.5 La préparation du substrat avant le revêtement

S'il y a une étape que l'on peut qualifier de très importante dans le processus de projection thermique, c'est bien la préparation du substrat. Tout comme tous les autres procédés de déposition ou de revêtements de surface comme le soudage, l'électro-plating, l'émaillage ou la peinture, une préparation non satisfaisante peut être pénalisante pour l'adhésion du revêtement sur son substrat

A titre d'exemple dans le cas d'un substrat en aluminium ou l'un de ses alliages qui ont la particularité d'être recouverts d'une couche infime d'oxyde (Al203) très stable, cette dernière doit être détruite pour favoriser un bon accrochage du revêtement sur son substrat. Deux voies sont possibles, un traitement mécanique (sablage par exemple) ou un traitement physico-chimique, le revêtement devant être réalisé dans la continuité.

De nombreux travaux ont été réalisés pour trouver la meilleure préparation relative au meilleur accrochage des revêtements sur leur substrat.

- Les trois méthodes suivantes donnent les meilleurs résultats :
- Le nettoyage et décapage chimique,

- Le sablage avec un abrasif (corindon par exemple), (voir figure suivante),
- La préparation par usinage : elle consiste à réaliser une forme de filetages (voir 2ème figure suivante) sur la surface à traiter. Ce type de préparation correctement menée donne une très bonne adhérence et a l'avantage d'être réalisée directement dans la continuité de l'opération d'usinage de la pièce.

La préparation avec une sous-couche d'accrochage. Dans la plupart des cas l'adhésion est mécanique Cependant avec certains matériaux comme le Nickel-Aluminium Ni5Al, l'Aluminium-bronze, l'accrochage avec la plupart des métaux est métallurgique, il est normalement supérieur à la cohésion du dépôt lui même (des tests de traction conduisent à la dé-cohésion dans le revêtement et non à l'interface dépôt-substrat). De part ces propriétés exceptionnelles, ces matériaux peuvent servir d'accrochage entre le revêtement final et le substrat. Diverses méthodes peuvent être retenues pour la préparation de la surface avant projection de la sous-couche. Elles sont :

- l'attaque chimique,
- le sablage (cette méthode a l'avantage de réduire les contraintes de fatigue), le procédé donne une surface propre et satisfaisante,
- l'usinage même s'il est très grossier,
- le meulage grossier avec une meule à gros grains conduit à un bon état de surface pour la projection de sous-couches d'accrochage comme le Ni5Al [25].

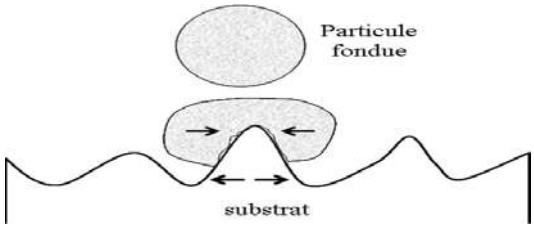


Figure I–22: Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface

Les différentes préparations de surface utilisées en projection thermique peuvent être classées en deux catégories :

- Les préparations dites (mécaniques)
- Les préparations dites (chimiques)

I.5.1 CONSTRUCTION DES DEPOTS :

Un dépôt réalisé par projection plasma, est formé par l'écrasement de particules sur un substrat préalablement préparé. Le dépôt, ainsi constitué, peut se représenter par une structure lamellaire hétérogène [28] (une particule est déjà solidifiée lorsque la suivante arrive au même point) constituée par un empilement de particules individuelles plus ou moins bien fondues [27]. La structure lamellaire

des dépôts est responsable de l'anisotropie des propriétés mécaniques [29]. La qualité des dépôts projetés dépend essentiellement de la morphologie des lamelles et de la nature du contact entre elles [30, 31, 32]. Une bonne compréhension des mécanismes gouvernant l'écrasement des particules est donc indispensable.

1.5.2 Ecrasement des particules sur le substrat

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule (Figure I – 23). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement [33, 34]. L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes [37, 35] : impact initial, étalement de la particule et enfin refroidissement et solidification. A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse, il a été observé pour des particules d'alumine que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) se passe toujours si leur nombre de Sommerfeld *K* (Tableau 1–2) est supérieur à 70 et parfois quand $10<K<70$ [36]. Cet éclaboussement croît en fonction de *K* et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3 mm, c'est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène

- **l'impact**

A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse, il a été observé pour des particules d'alumine que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) se passe toujours si leur nombre de Sommerfeld K (Tableau 1–2) est supérieur à 70 et parfois quand $10<K<70$. Cet éclaboussement croît en fonction de K et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3 mm, c'est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène [38].

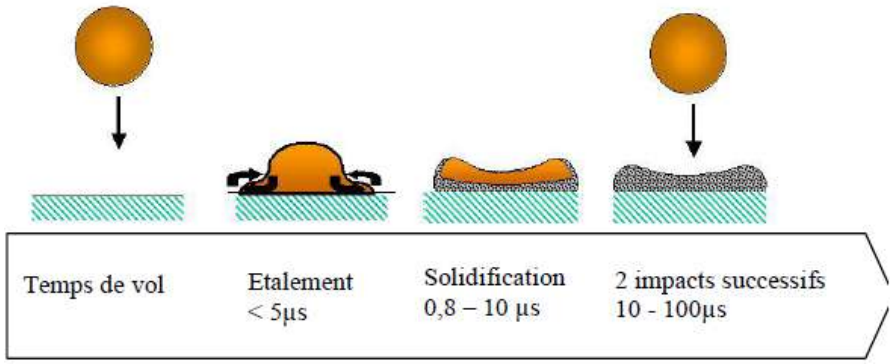


Figure I–23 : Mécanismes d'étalement des lamelles,

❖ **l'étalement**

Madjeski a obtenu, une équation différentielle compliquée qui n'a pas de solution analytique. Il a simplifié le modèle en supposant que la solidification ne commence que lorsque l'étalement de la lamelle est terminé et que l'énergie cinétique de la particule se transforme principalement en travail de dissipation visqueuse. Le degré d'étalement dans ce cas, peut être calculé à partir de l'équation suivante qui dépend des nombres de Weber et de Reynolds :

$$\frac{3.\varepsilon^2.m}{w_e}+\frac{1}{R_e}\left(\frac{\varepsilon_m}{1.2841}\right)^5=1$$

Cette formule peut être simplifiée, pour un nombre de Reynolds Re > 100, et un nombre de Weber We > 1000 et se réduit alors à **:**

Où est le degré d'étalement maximum :

$$\varepsilon_m=1.2941R_e^{0.2}$$

Où ε_m est le degré d'étalement maximum

I.6. La solidification des lamelles

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle-substrat varie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène [39]

l'impact Nombre de reynolds (R_e) : appendant l'étalement	$R_e = \frac{\rho_p . d_p . V}{\mu}$	V = V_p à V = V_f
Nombre de Weber (W_e) : l'impact apendant l'étalement	$W_e = \frac{\rho_p . d_p . V^2}{\sigma_p}$	V = V_p à V = V_f
Nombre de Sommerfeld à l'impact (K) :	$K = \sqrt{W_e \sqrt{R_e}}$	
Paramètre de splashing d'étalement (K_f) :	$K_f = \sqrt{W_{e_r} \sqrt{R_{e_r}}} = 0.5 . a^{1.25} . R_e^{-0.3} . K$ $a = \frac{V_f}{V_p}$	
Degré d'étalement (ε) :	$\varepsilon = \frac{D}{d}$	

Tableau 1-2 : Rappel de quelques nombres caractéristiques de l'écoulement plasma et des spats (sans dimension) [40]

I.6.1 FORMATION DU DEPOT

Le dépôt obtenu est formé par le mécanisme d'adhésion inter-particules et particule-substrat. Il est en général le résultat de plusieurs mécanismes de liaisons opérant simultanément, ce qui donne une structure lamellaire. Pour aider à la compréhension, Les schémas (figure I-25) montrent les différentes phases de projection. Le contact entre lamelles et/ou entre les lamelles et le substrat va en grande partie conditionner les propriétés thermiques et mécaniques des dépôts.

L'accrochage d'une particule sur celle précédemment déposé et/ou sur le substrat est réalisé par différents mécanismes [41, 42] :

- l'accrochage mécanique : c'est le mécanisme le plus important pour les dépôts céramiques. Ce type d'accrochage est très amélioré par le sablage préalable des substrats.

- Les lamelles suivent les contours des aspérités et les serrent en se contractant au refroidissement (figure I-24).
- l'adhésion chimique : ce type d'adhésion est observé dans le cas où le substrat et le matériau projeté présentent une affinité chimique avec la formation d'un alliage ou d'un composé intermétallique.
- l'adhésion physique : contrôlée par le phénomène diffusionnel, qui a lieu lorsque le substrat est maintenu à température élevée, comme lors de la projection sous vide.

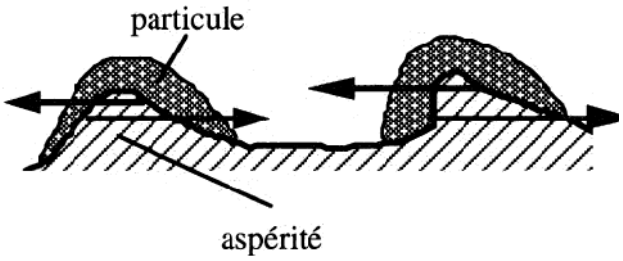


Figure I-24 : L'écrasement, des particules sur des aspérités

Après écrasement, l'énergie thermique contenue dans la particule est extraite par le substrat, d'où un refroidissement très rapide des particules de l'ordre de 105 à 106 K/s. Ce refroidissement brutal induit des tailles de grains très fines (moins de 1 μm) favorables aux propriétés mécaniques, mais provoque l'apparition de phases métastables, voir vitreuses. Par exemple pour l'Alumine, il y a l'apparition de la phase γ [42].

I.6.2 Solidification et refroidissement des particules

La vitesse de refroidissement a été estimée à l05-106 K/s. En effet, la chaleur est rapidement extraite au travers de l'interface substrat/particule, ce qui implique une grande vitesse de refroidissement [43].

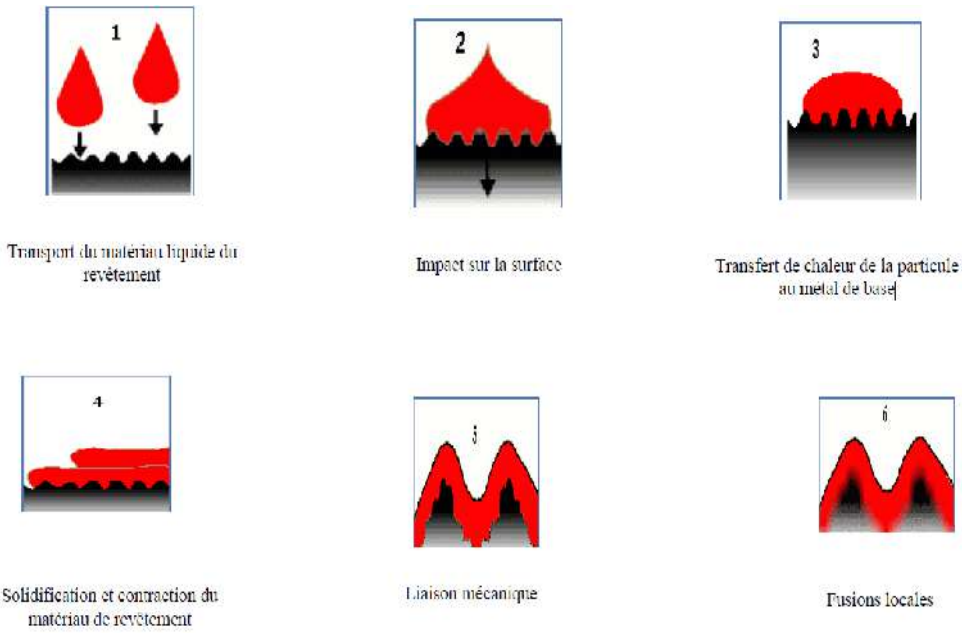


Figure I–25 : Processus de formation du dépôt

I.9. Conclusion :

Cette étude sur la formation des dépôts par projection thermique met en évidence leurs applications et les axes de développement. La réalisation d'un dépôt à partir d'une poudre à base d'un alliage d'aluminium nécessite une étude très soignée des conditions de fabrication de la poudre.

Dans ce travail, les objectifs seront plus liés à la compréhension et au contrôle des mécanismes intervenant lors de la projection thermique et nous attacherons à l'étude d'étalement de la gouttelette sur le substrat

Introduction

Dans ce chapitre on va décrire les équations et les méthodes numériques qui expliquent le phénomène physique de l'étalement avec solidification des particules sur substrat.

II.2. Modèle dynamique

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

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

La formulation mathématique des lois de la conservation régissant les phénomènes physiques comme les écoulements de fluides, est généralement écrite sous forme d'équations aux dérivées partielles comme suit [44].

II.2.1. Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \qquad \textbf{(II.1)}$$

Ou dans une notation plus compacte :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+div(\rho u)=0 \qquad \textbf{(II.2)}$$

II.2.2. Equation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Les équations de la quantité de mouvement (ou équations de Navier-Stokes) pour des fluides newtoniens incompressibles en régime laminaire sont données par les expressions suivantes :

Suivant OX :

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\right)+(\rho-\rho_0)g_x \qquad \textbf{(II.3)}$$

Suivant OY :

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}\right)+(\rho-\rho_0)g_y \qquad \textbf{(II.4)}$$

Où les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont donnés par :

$$\mu=\tau_{xy}=\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] \qquad \textbf{(II.5)}$$

$$\tau_{xx}=\mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right] \qquad \textbf{(II.6)}$$

$$\tau_{yy}=\mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right] \qquad \textbf{(II.7)}$$

II.2.3. Equation de conservation d'énergie

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

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} + \rho c_p U.\nabla T = div\left(\lambda gradT\right) + \phi \qquad \textbf{(II.8)}$$

$$\phi = \tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}$$

Avec :

$\rho c_p \frac{DT}{Dt}$: La variation totale d'énergie,

$\rho c_p U.\nabla T$: La variation d'énergie par convection,

$div\left(\lambda gradT\right)$: La variation d'énergie par conduction,

ϕ La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

II.3.modèle thermique

Les modèles de transfert thermique unidimensionnel couplés aux modèles qui décrivent l'étalement de la matière sur le substrat traite le refroidissement et la solidification des lamelles comme un problème uniquement thermique.se sont des modèles simples comparés aux modèles de l'écoulement de la phase fluide comme ceux développés par Mostaghimi et Al [45].qui traite la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leurs morphologie, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière .

Ce paragraphe est consacré aux modèles physiques nécessaires à l'étude du phénomène couplé de l'étalement et la solidification de particules, métallique ou céramique, lors d'un procédé de projection thermique.

II.3.1.Transfert de chaleur avec changement de phase

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) [46]. C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan [47]. En général ces méthodes cherchent à approcher la position du front de solidification/fusion au cours du temps, et se divisent alors en deux catégories principales :

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

II.3.1.1.Méthode a grille mobile

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante [48].
Dans le domaine occupé par la phase liquide :

$$\rho_l c_{pl} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\lambda_l \nabla T) = 0 \qquad \textbf{(II.10)}$$

Dans le domaine occupé par la phase solide s

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\lambda_s \nabla T) = 0 \qquad \textbf{(II.11)}$$

A l'interface liquide-solide Γ (x, t)

$$\rho l_f \vartheta_n = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \quad \textbf{(II.12)}$$

Dans les équations ci- dessus :

n : représente la normale à l'interface Γ (x, t)=0

ϑ_n : La composante normale de la vitesse de déplacement de l'interface liquide/solide.

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif .le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose a ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier [47].

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

II.3.1.2.Méthode a grille fixe

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

II.3.1.3.Méthode d'enthalpie

La méthode d'enthalpie a maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide .Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et Al. Sous ses différentes formes. Voler a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisées jusqu'à aujourd'hui [49].

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

fin. La fonction d'enthalpie massique H(T) est introduite (fig.-II.1) elle inclut la chaleur latente par unité de masse L_f est définie comme suit :

$$H(T) = \int_{Tref}^{T} T(dT) + f_l L_l \qquad \textbf{(II.13)}$$

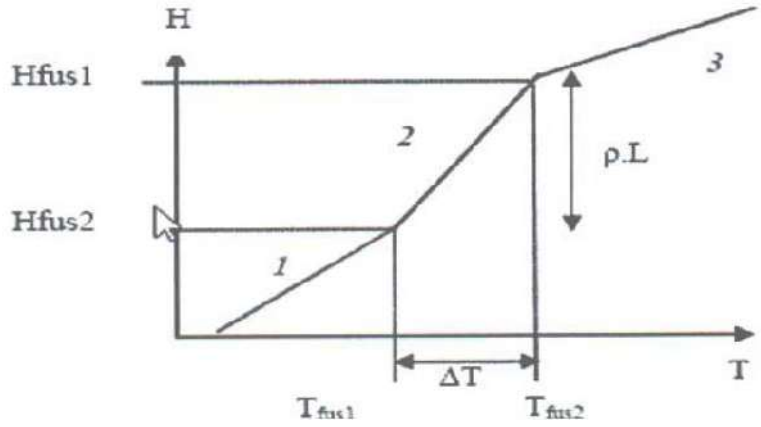


Figure II.1: évolution de l'enthalpie en fonction de la température [44].

La conservation de l'énergie s'exprime alors [50].

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla.(\rho H \upsilon) = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \qquad \textbf{(II.14)}$$

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

$$\frac{\rho\partial(H)}{\partial t} + \rho\upsilon.\nabla.H = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \qquad \textbf{(II.15)}$$

Et on fonction de la température

$$\rho c_p \frac{\partial(T)}{\partial t} + \rho c_p \upsilon.\nabla.T = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q + \rho l_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad \textbf{(II.16)}$$

II.3.1.4.Méthode de la chaleur spécifique équivalente :

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique C_P [50].ainsi, si le chemin de solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente **:**

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t}\frac{\partial T}{\partial t} = \rho c_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \textbf{(II.17)}$$

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

$$\rho c_p^{eq} = \rho c_p - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad \textbf{(II.18)}$$

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

$$\rho c_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \textbf{(II.19)}$$

Le changement de phase est alors traité comme un non linéarité de propriétés physique

II.3.2.Modèle thermique utilisé

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

$$\rho c_p^{eq}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+(u.\nabla)T\right)=\nabla.(\lambda\nabla T)+Q \qquad \textbf{(II.20)}$$

II.5.Conclusion

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

Introduction

Les équations décrites au troisième chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. Il existe plusieurs méthodes numériques (éléments finis, différences finies-volumes finies,) qui permettent de trouver une solution avec la discrétisation du domaine et la résolution d'équation avec un grand nombre d'inconnues.

III.1. Méthodes de discrétisation

III.2.1 Méthode des différences finies.

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

Elle consiste à approximer les dérivées de l'EDP par des troncatures de séries de Taylor. La substitution de ces approximations dans l'équation différentielle donne les équations aux différences finies.

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

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

III.2.2Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une technique numérique de discrétisation, elle permet d'avoir des solutions même avec des champs variables dans le temps et des matériaux hétérogènes, ou non linéaires. Par cette méthode, tout le domaine d'analyse est divisé en sous domaines élémentaires nommés volume de contrôle

Elle se déduit à partir de la MDF. Le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies).

La forme intégrale de l'EDP est discrétisée dans le domaine d'étude et intégrée sur chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs..
Grâce à un libre choix de la fonction de liaison entre nœuds consécutifs, la procédure conduite à une solution plus précise que celle fournie par la MDF. [52 ,53].

III.2.3Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à repartir le domaine d'étude en zones élémentaires (éléments finis) et à représenter l'inconnue par une approximation polynomiale d'ordre un ou deux dans chacune de ces zones, puis, l'erreur due à l'approximation doit être minimisée. Cette méthode est très performante dans les géométries complexes mais elle nécessite un espace mémoire important

. D'autre part, La simulation numérique est de plus en plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour modéliser les écoulements que les transferts thermiques dans le moule. Des logiciels comme **ANSYS** permettent en effet de déterminer des répartitions de température à la surface du moule et la pression, la vitesse d'écoulement dans le moule ainsi le temps de refroidissement. La conception du moule et en particulier du système de refroidissement est donc basée sur l'expérience de l'utilisateur uniquement**.**

III.2.3.1 Présentation de la méthode

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

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

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

III.2.3.2 Forme générale des équations du système [40]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_{X} c_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho V_{Y} C_{\phi}\phi\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)+S_{\phi}$$

Le procédé de discrétisation par EF consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire [60].

$$\left(\left[A_e^{\text{transient}}\right]+\left[A_e^{\text{advection}}\right]+\left[A_e^{\text{diffusion}}\right]\right)\{\emptyset_e\}=\{S_e^{\emptyset}\}$$

$$\left[A_e^{\text{transient}}\right]=\int W^e\frac{(\partial \rho c_{\emptyset}\emptyset)^e}{\partial t}d(\text{vol})$$

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

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

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

ϕ: Variable généralisée

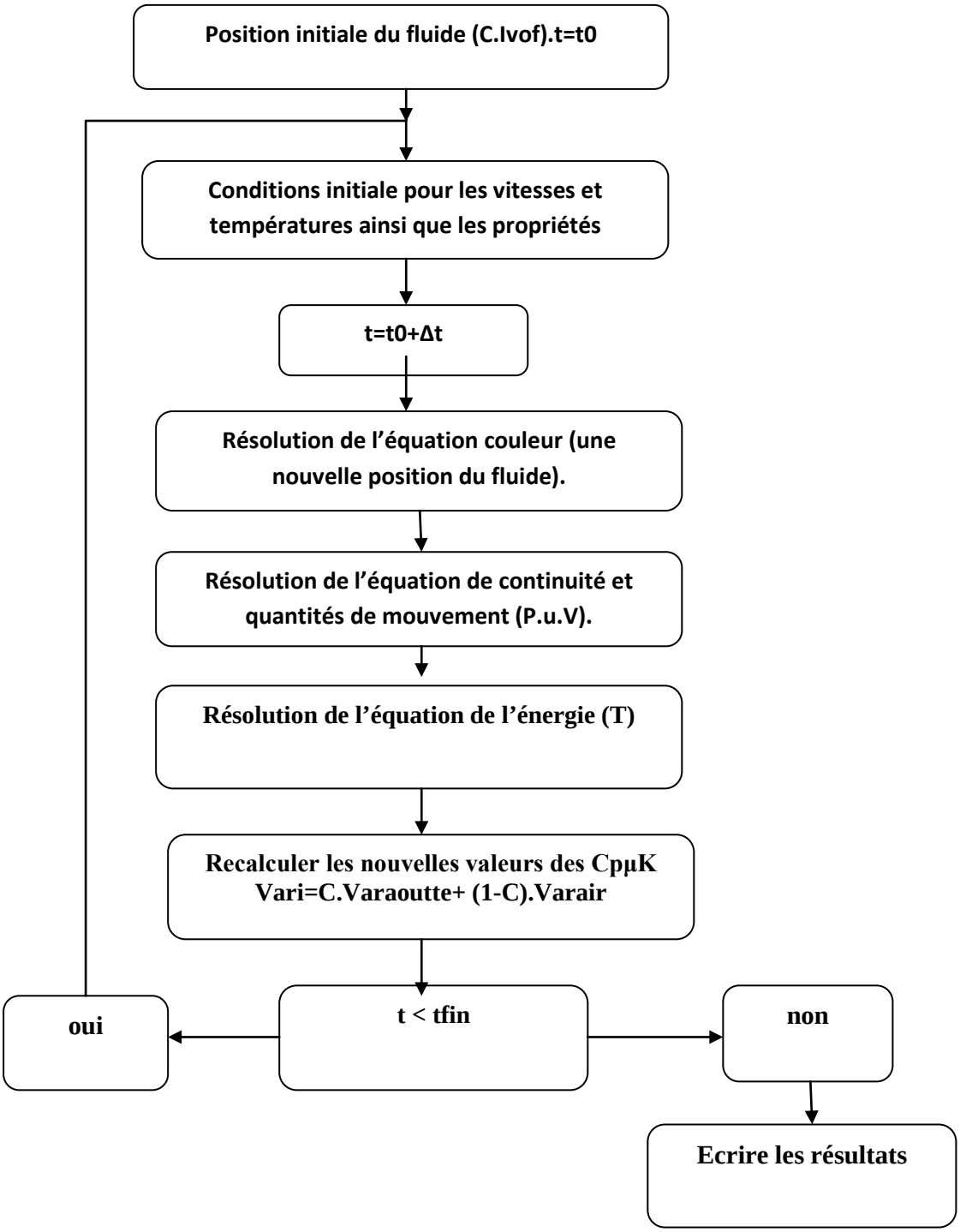
C_ϕ: Coefficient d'advection transitoire.

Γ_ϕ: Coefficient de diffusion.

S_ϕ: Termes source.

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

Tableau III.1 : Tableau de Représentation d'équation de transport. [54]



Figue III..1 Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps, [65].

III.3. Méthodes de discrétisations

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

- Description du problème (Géométrie, caractéristiques physiques, maillage, limites du domaine d'étude).

- Mise en œuvre de la méthode numérique de simulation (Différences finies, éléments finis, volumes finis, intégrales de frontière) plus une méthode itérative.

III.3.1 Maillage élément finis [52,53]

Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (domaine élémentaires).
Il existe différents types d'éléments :

- élément linéique (1D).
- élément surfacique (2D).
- élément volumique (3D).

III.3.2 Calcul d'interfaces

Les techniques de calcul d'interfaces peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles (figure III.2) en fonction de maillage que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode et la Méthode Eulérienne (Maillage fixe) [55].

III.3.3 Evolution de la Surface Libre

Il existe deux types de méthodes numériques qui permettent de modéliser le déplacement d'interfaces ou surfaces libres : les méthodes dites Lagrangiennes et celles dites Eulériennes. On se place dans l'une ou l'autre de ces deux approches selon que l'on considère le maillage fixe ou évolutif au cours du calcul.

III.3.3.1 Approche Lagrangienne

La première approche appelée approche Lagrangienne [56] [57] [58] consiste faire évoluer directement le maillage `a chaque pas de temps en fonction du déplacement de l'interface. En effet, l'interface fait entièrement partie du maillage : elle est représentée par les faces de certains éléments du maillage. Ces éléments peuvent être inclus dans le maillage ou simplement les éléments frontières de ci dessous (Figure III.2)

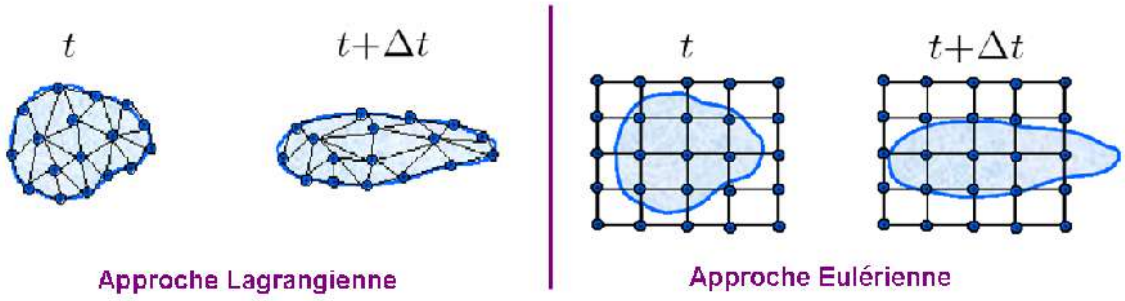


Figure III.2: Approche Lagrangienne et Approche Eulérienne

On parle alors de méthode dite de suivi d'interface (”Interface Tracking”) car le maillage suit exactement l'interface au cours du calcul. Les nœuds du maillage Sont déplacés, à la vitesse locale VN, en prenant comme nouvelles coordonnées spatiales $X_N^{t+\Delta t}$ qui sont la solution de l'équation (III.1) pour un nœud N au temps t+ Δt

$$\frac{dX_N}{dt} = V_N \Delta t \qquad \textbf{(III.1)}$$

Ce type de méthode permet donc de connaitre exactement l'interface au cours du
Calcul, tant que celle-ci n'est pas très déformée. En effet, pour conserver la précision nécessaire aux écoulements de type Fluide Buckling, elle nécessite une reconstruction du maillage induisant un temps de calcul excessif, ainsi que des algorithmes particuliers pour prendre en compte la coalescence lors des oscillations.Il n'existe pas dans la littérature actuelle, a notre connaissance, d'auteurs ayant utilisés ce type d'approche pour simuler numériquement le Fluid Buckling.

III.3.3.1 Approche Eulérienne

Dans la seconde approche, dite ”Eulérienne”, le maillage est fixe et ne dépend donc Pas de l'´evolution de l'interface qui se déplace a l'intérieur de celui-ci (Figure III.2) . On parle cette fois-ci de méthode de capture d'interface (”Interface Capturing”) Car, le maillage étant fixe, il faut capturer la position de l'interface dans le maillage au cours du calcul. Pour cela, certains auteurs utilisent des particules marquées (Méthodes particulaires), d'autres définissent une fonction *a* d'écrivant les domaines de calcul. Dans tous les cas, la position de l'interface une fois déterminée, doit être transportée au cours du calcul. Les méthodes ainsi utilisées se différencient par L'introduction ou non d'une fonction caractéristique ainsi que par le type de résolution Utilisée pour le transport de l'interface.
L'amélioration du temps de calcul, due a l'absence de remaillage, est donc en partie compensée par le calcul de l'´evolution de cette interface, non trivial. De plus, cette approche implique, soit un nombre de particules suffisamment élevé, soit une taille de maille suffisamment petite, pour pouvoir décrire précisément l'interface et les différents phénomènes de coalescence ou de rupture pouvant apparaître, par exemple, lors de la striction

d'un jet chutant par gravit´e. Elle permet, par contre, de rendre compte des écoulements multiphasiques aussi bien bidimensionnels que tridimensionnels. Sont présentées ci-après quelques méthodes de capture d'interface appliquées par Différents auteurs au phénomène de Fluide Suckling. La première de ces méthodes Appelée "Marker an Cella" est une méthode dite particulaire qui utilise des marqueurs Lagrangiens. Les autres méthodes nécessitent toutes l'introduction d'une fonction ***a*** Qui est ensuite déplacée de façon Lagrangienne en résolvant l'´equation **(III.2**) ou de façon Eulérienne en résolvant l'´equation de convection pure suivante :

$$\frac{\partial a}{\partial t} + V.\nabla a = 0 \qquad \textbf{(III.2)}$$

ou **V** est la vitesse locale de l''´ecoulement.

Note : Les méthodes eulériennes peut être classées en deux catégories

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

III.3.3.1.1 Les méthodes de suivi de front

Il existe différente méthode pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

c) Méthode de ligne de niveau (level set)

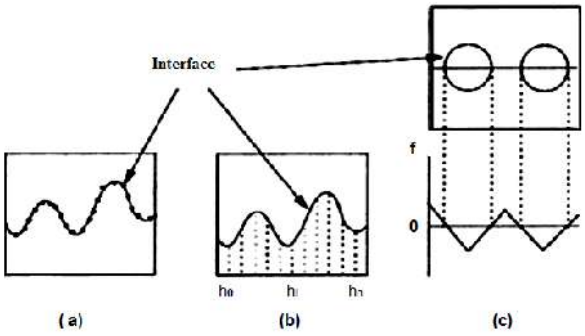


Figure. **III.3**: Différentes méthodes de suivi de front [52].

III.3.3.1.2 Les méthodes de suivi de volume

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

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

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluide) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide [59].

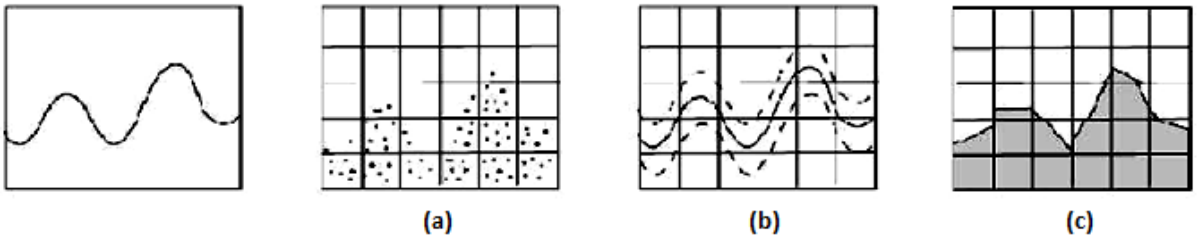


Figure. **III.4.**Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque

III.4. La Méthode VOF CIAM

Nous utilisons la méthode VOF CIAM qui est une méthode de Construction de l'interface affine par morceaux. VOF CIAM se décompose en trois parties : on doit tout d'abord reconstruire la représentation de la surface libre à partir de la fraction volumique ensuite on transporte l'interface a l'aide d'une méthode lagrangienne et enfin on calcule le nouveau champ de fraction volumique. L'interface est alors approchée par un segment en 2D comme on peut le voir sur la figure (III.5). La force de la méthode VOF CIAM est la reconstruction de l'interface qui se fait-on fonction de son orientation et de la fraction volumique. Ainsi ; par rapport à des méthodes qui utilisent des schémas de discrétisation (schémas UPWIND, QUICK, TVD..), on élimine totalement le phénomène de diffusion numérique, et par rapport à d'autre méthodes VOF (VOF SLIC) on suit l'interface de façon plus précise.

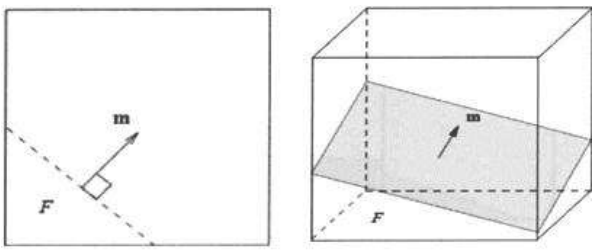


Figure. III.5 Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les trois méthodes de base utilisé pour la discrétisation d'un problème couplé dynamique et thermiques avec solidification rapide; on a fait une discrétisation de l'équation de transport par la méthode des éléments finis qui a permet de faire le passage de l'EDP vers des systèmes algébrique facile à résoudre relativement.

Pour éviter les étapes de programmation numérique qui nécessité beaucoup de temps on propose d'utilise le logiciel de calcule ANSYS qui et représenté dans le chapitre suivant

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentant les résultats de l'étude de la situation numérique de l'impact de goutte plaine d'aluminium sur un substrat d'acier d'un part ; et d'autre part l'étude de l'effet de la présence des pics et creux surfacique de substrat sur le processus de l'étalement de particule lors de formation des dépôts d'aluminium.

IV.2. Logiciel d'analyse d'ANSYS

ANSYS est parmi les premiers éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception (gain de temps).

Les industriels conçoivent des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts

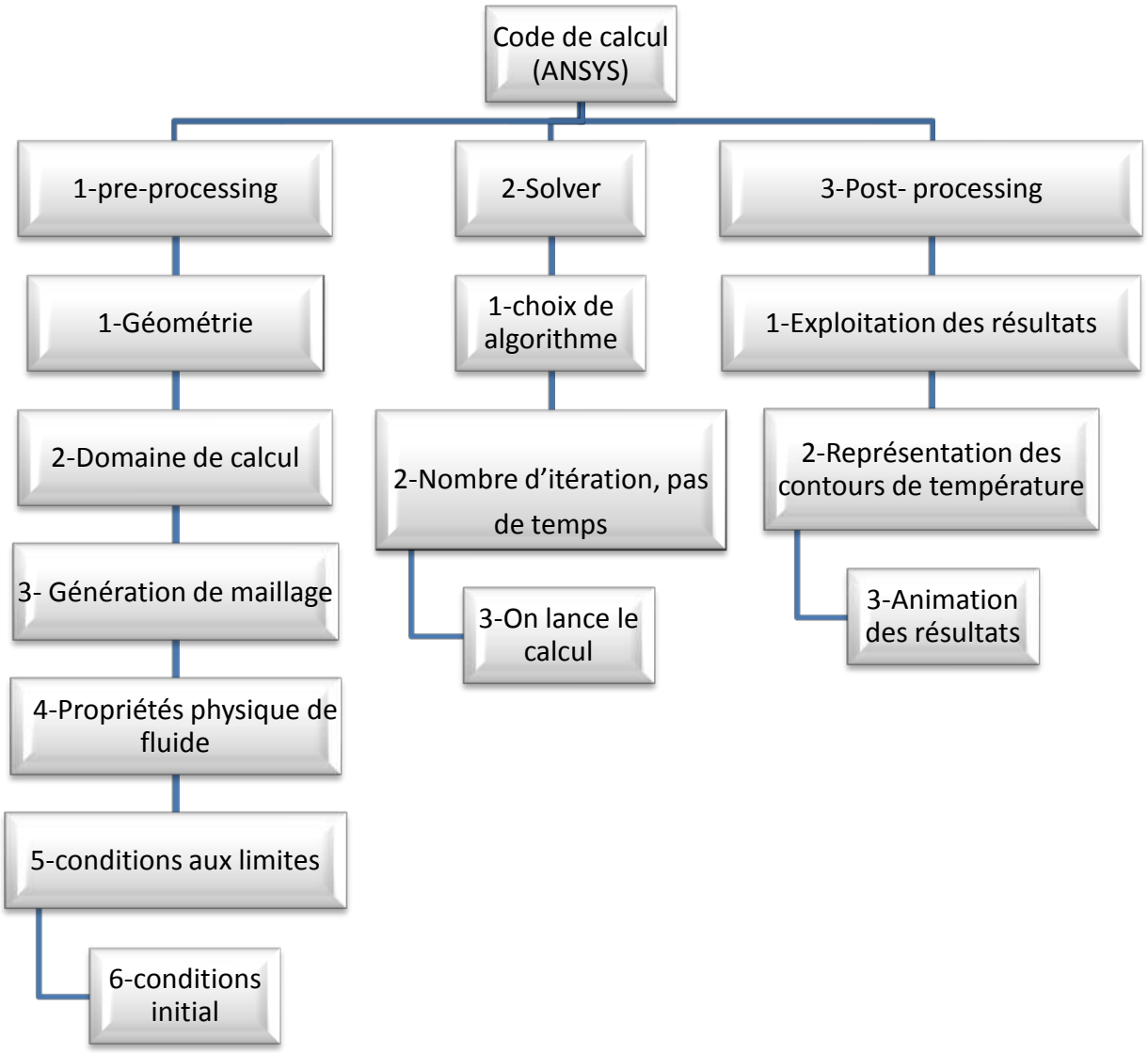


Figure IV–1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.3. Matériaux utilisés :

Dans cette étude numérique nous travaillons sur des particules d' aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat métalliques (acier d'outil)le choix de l'alumine a été orienté par des nombreuses études déjà menées ,telle que les travaux expérimentaux de Minxia Xue ,Yoav Heichal ,Sanjeev Chandra et java Mostaghimi qui ont été consacrés à

l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'alumine sur substrat en acier ;et qui sera l'objet d'identification de nos résultats.

IV.3.1. L'aluminium [61,62]

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

- une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de 1,09.106 j/kg.
- une bonne résistivité électrique >1012 Ohm. m
- une dureté HV sous une charge de 1N de 9,21 GPa
- une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'alumine par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10 – 5mm3/Nm, à l'abrasion par une bille de Sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5 N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à 3.10-3 mm3 /Nm lorsque la température augmente à 400OC.
- une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux alcalins, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance à l'oxydation.
- Ces performances font de ce matériau l'objet de nombreuses applications dans des domaines très variés.
- les applications mécaniques, l'alumine est l'abrasif le plus répandu à côté du carbure de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides.
- les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'alumine sert à protéger l'acier contre la corrosion a haute températures.
- les applications médicales ; le caractère biocompatible de l'alumine permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie.
- les applications électriques et électroniques : l'alumine est utilisée dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation.
- les applications optiques : les films d'alumine permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires.

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

Propriétés	Alliage d'aluminium	Acier d'outil
Densité (kg/m3)	2570	7800
Température de fusion en oc	570	*
Chaleur de fusion [j/kg]	389	*
Viscosité cinématique en [m2/s]	°c 0 4.5 E-7 700 4 E-7	*
Conductivité thermique liquide [W/m K]	70	*
Chaleur spécifique liquide [j/kg k]	1000	*
Tension superficielle [N/m]	1.07	*
Conductivité thermique solide [W/m K]	°c 400 144 500 147 630 70	°c 200 26 .
Chaleur spécifique [j/kg k]	°c 300 980 400 1050 479 1150	°c 20 460 500 550 600 590

Tableau IV -1 : propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. [63]

IV.4. Identification:

Pour l'identification, ou l'objective est de justifie le model utilisé ; nous proposons pour cet première partie de travail de comparer nos résultats de simulation d'impact de goutte sur substrat dans les mêmes condition des travaux numérique et expérimental de Javad Mostaghimi[64].

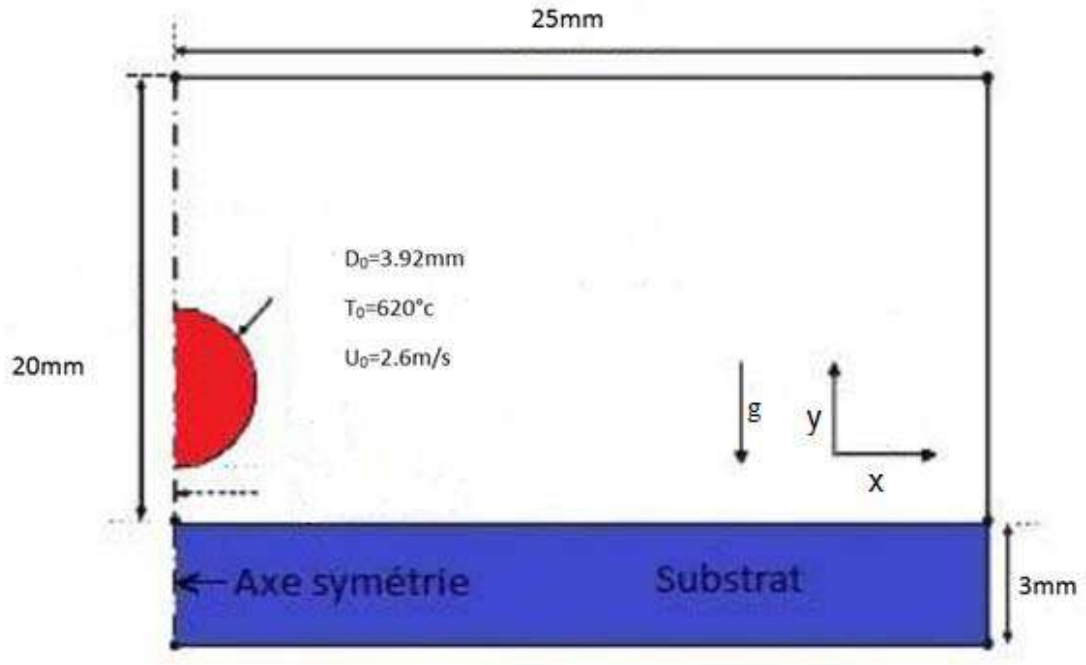


Figure IV– 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification

IV.5. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus :

La figure IV-3 représente les résultats expérimentaux et de simulation d'étalement d'une particule en aluminium plein d'un diamètre de 3.92mm initialement à une température de 630 C° et une vitesse de- 2.6 m/s sur un substrat en acier d'outil initialement à 200 C°. la gouttelette commence à se propagée à 0.01 ms, symétriquement par rapport au point d'impacts, il faut noté que pour les deux résultats le liquide suit la topographie de la surface.

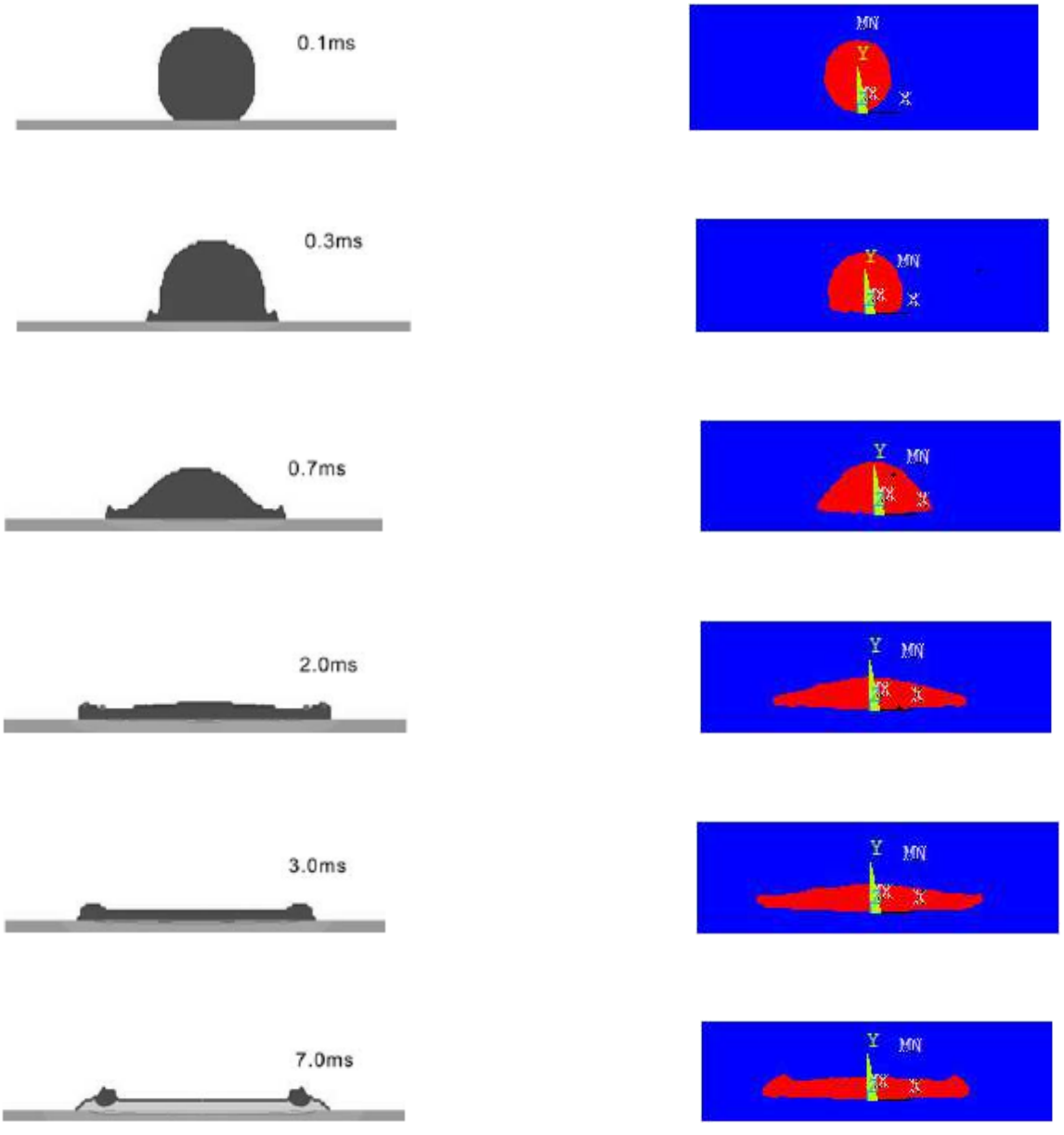


Figure IV–3 : représentation spatiale de la dynamique d'étalement dans les mêmes conditio

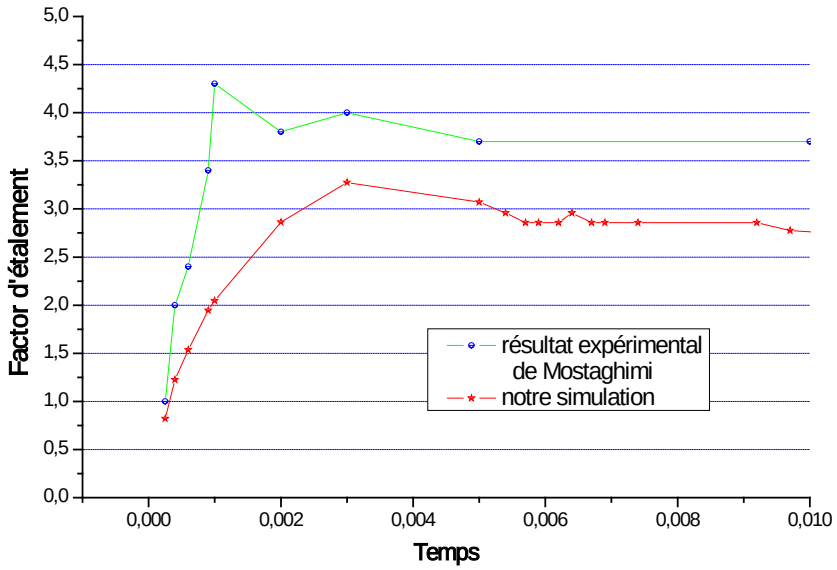


Figure IV- 4. Facteurs d'étalement**.**

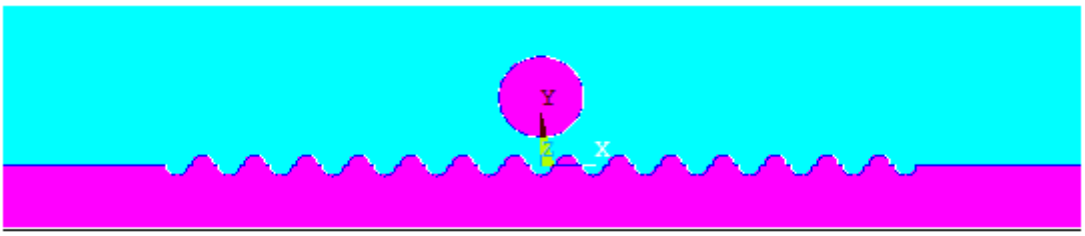
la figure IV- 4, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium pour les deux cas ,nous notons qu' aux premiers instants, ces facteurs augmentent rapidement ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande si on comparant les deux courbes nous allons remarquer que dans l'expérimentation de mostaghimi la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 3.27 alors que dans notre simulation elle atteint 2.95

puis les deux courbes diminuent pour se stabiliser à ces valeurs suivantes :pour la courbe de mostaghimi est de 3.07 et pour notre courbe est de 2.44

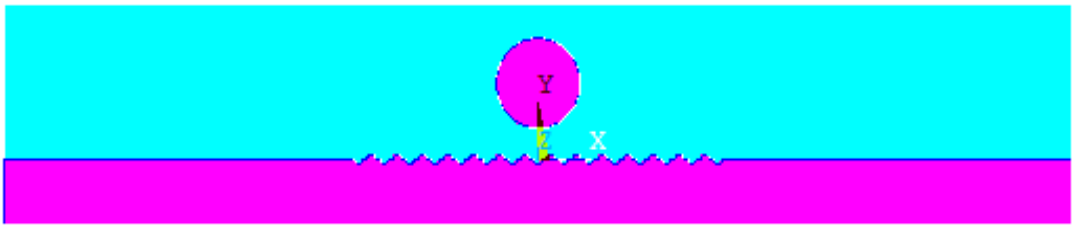
IV.6. Description du domaine d'application

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impacte d'une particule en aluminium pleine déposée sur substrat en acier ,pour deux cas (R1,R2) possible de présence des pics et des creux c'est représente sur la figure (IV– 5).

Cas 1 :

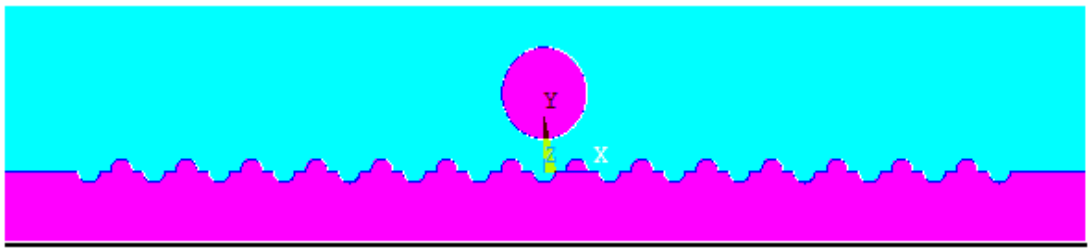


R1=0.5mm E=0.2mm

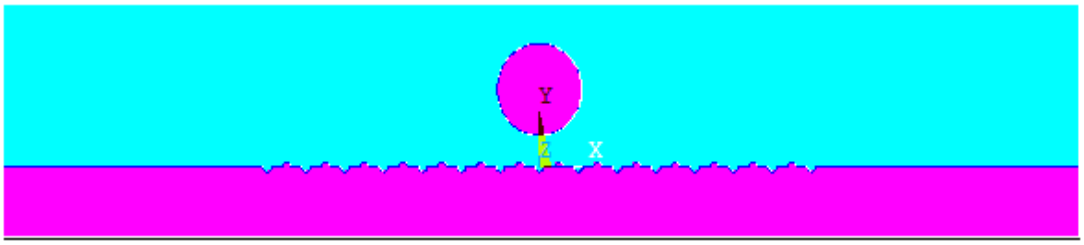


R1=0.2mm E=0.2mm

Cas 2 :



R1=0.5mm E=0.5mm



R1=0.2mm E=0.5mm

Figure IV– 5. Schéma du domaine calcul

.

IV.7 Pour le diametre des pics et creux D=1mm et E=0.2mm

La figure IV-6-1 représente la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette pleine à diamètre 3.92mm et une température de 630 C°, sur substrat (cas 1) à 200 C°. Et le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard.

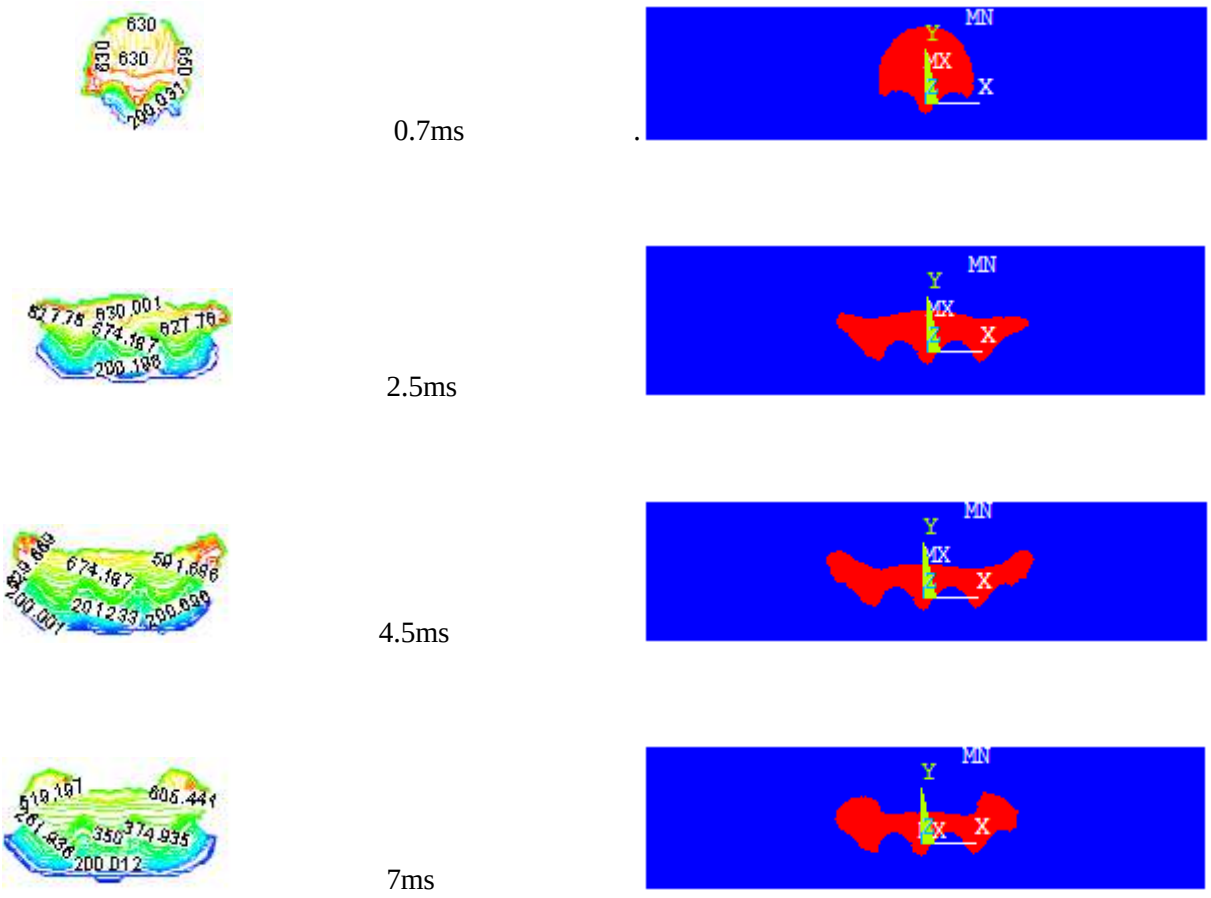


Figure IV-6-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

Cette figure montre clairement des zones de bonne et de mauvaise contacte à l'interface particule/substrat et un mauvais transfert de chaleur, de la particule vers le substrat, ce qui entraîne une faible vitesse de refroidissement.

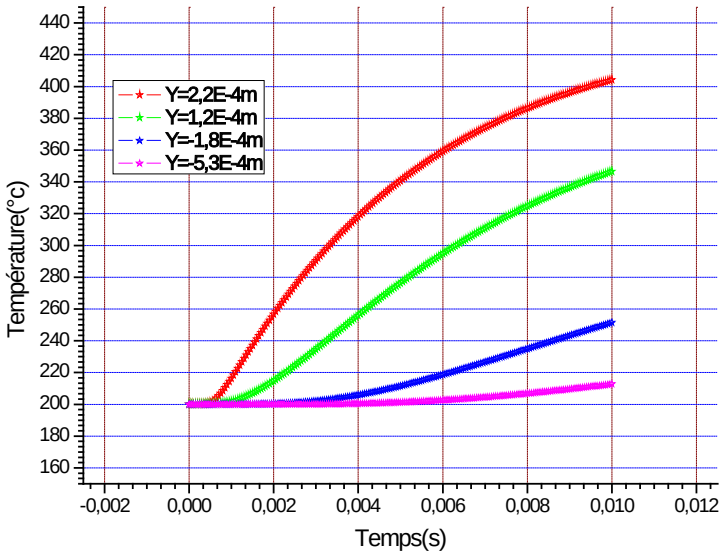


Figure IV-6-2 : profiles de température dans le temps poure qutres positions dans substrat

Cette courbe représente un comportement identique sur le substrat pendant le premier moment de l'impact, on note cependant que dans un second temps un comportement relativement similaire dans l'allure de variation, et on note que les valeurs des températures pour le point de contact sont plus élevées, mais les valeurs des températures des points au-dessous dans substrat diminuées.

On peut constater aussi que, aux tous premiers instants suivants le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement (figure III.7) et la Resistance thermique diminue. Après un étalement partiel, la surface de contact entre le substrat et la goutte augmente, alors que la température du substrat reste quasi-constante. La température de substrat augmente beaucoup plus lentement alors que la température de surface de la goutte s'abaisse ; donc la résistance de contact associée augmente, qui favorise la diffusion thermique radiale dans la lamelle.

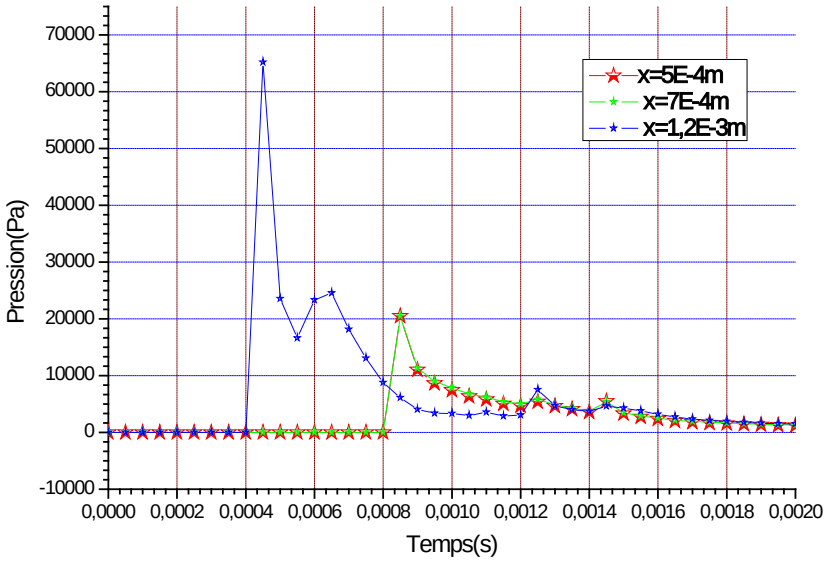


Figure IV-6-3 : la variation de la pression d'impact pour trois point à l'interface particule / substrat

illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (65.163 KPa) , où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies,

l'augmentation de pression à l'impact dans le troisième point (x=1.2mm) est plus grande que celle dans les points (x=0.5mm , x=0.7mm), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ce cas est bonne que dans les deux autres cas.

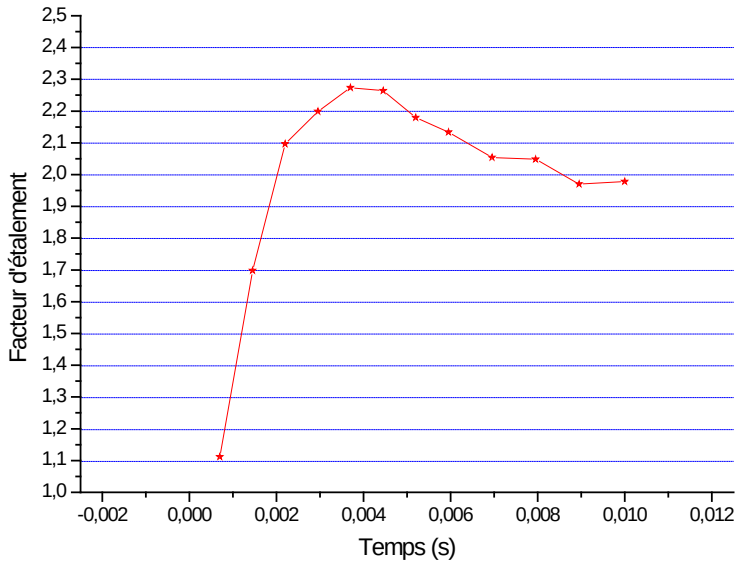


Figure IV-6-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

La figure IV- 6-4, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium nous notons que ce facteur augmente rapidement aux premiers instants ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande

On remarque que la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 2.27 après il est diminué pour atteindre la valeur 1.97

IV.8 Pour le diametre des pics et creux D=0.4mm et E=0.2 mm

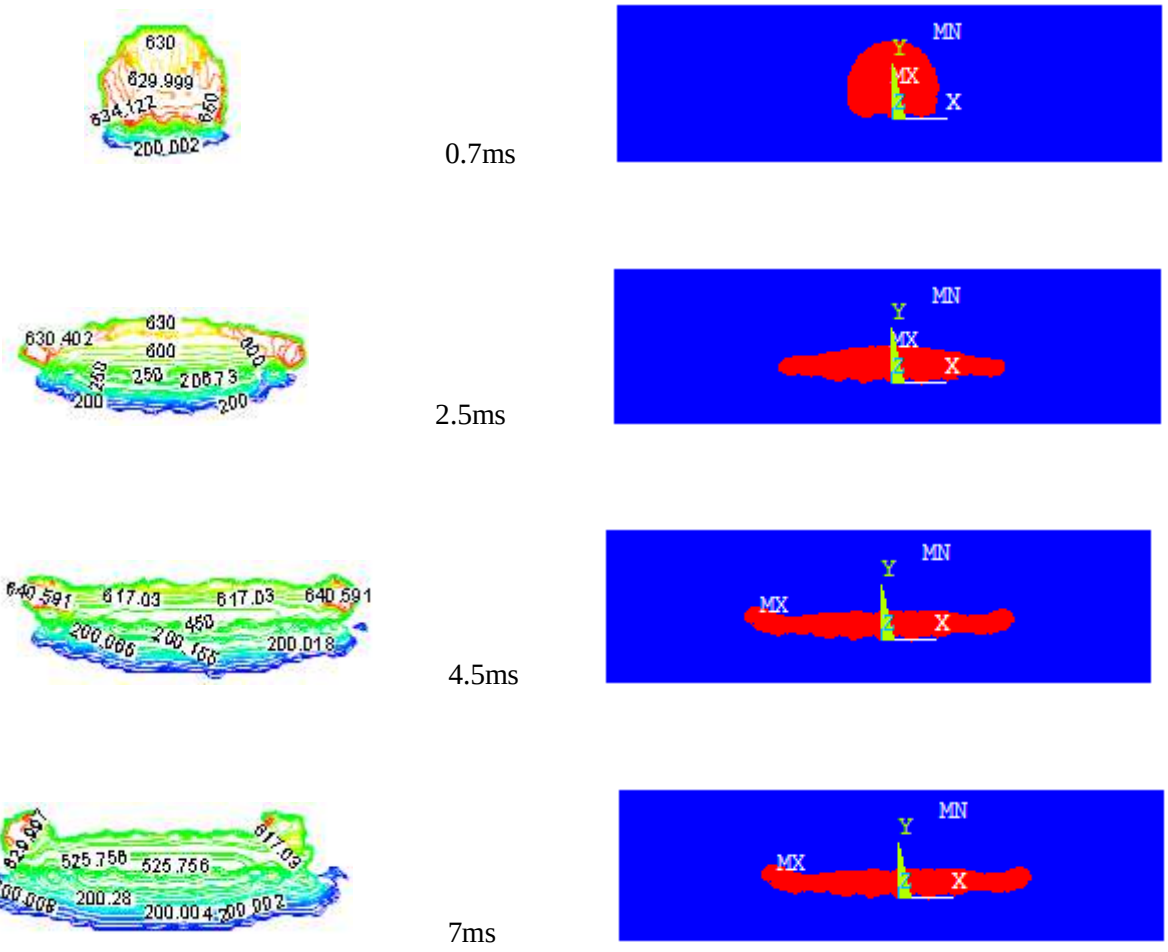


Figure IV-7-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium**.**

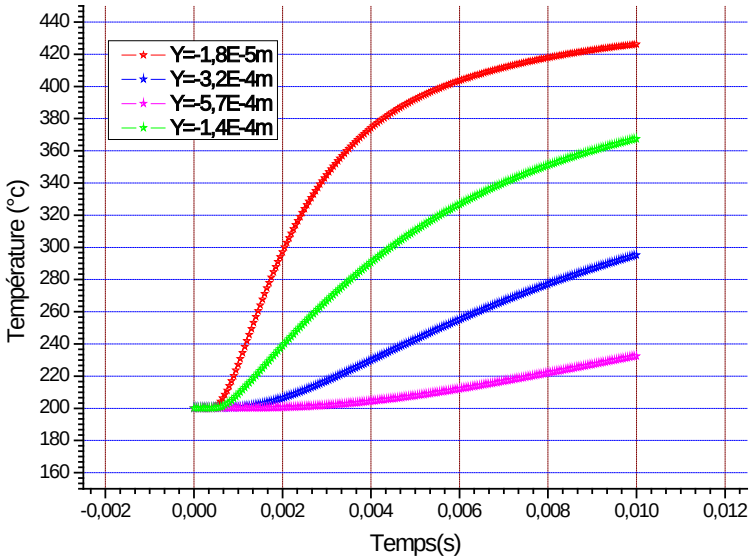


Figure IV-7-2 : profiles de température dans le temps pour quatre positions dans substrat

Figure IV-7-2 représente les résultats numérique des profiles de température en quartes positions dans le substrat, on note que :

- à - 0.018mm et- 0.14mm sous la ligne d'impact, la température de substrat augmente rapidement puis elle se stabilise et reste constante.
- -0.32mm sous la ligne d'impact, la température s'élève un peu puis elle se stabilise.
- - 0.57mm la température reste constant dès le début de l'étalement et elle est égale à sa température initiale de substrat.

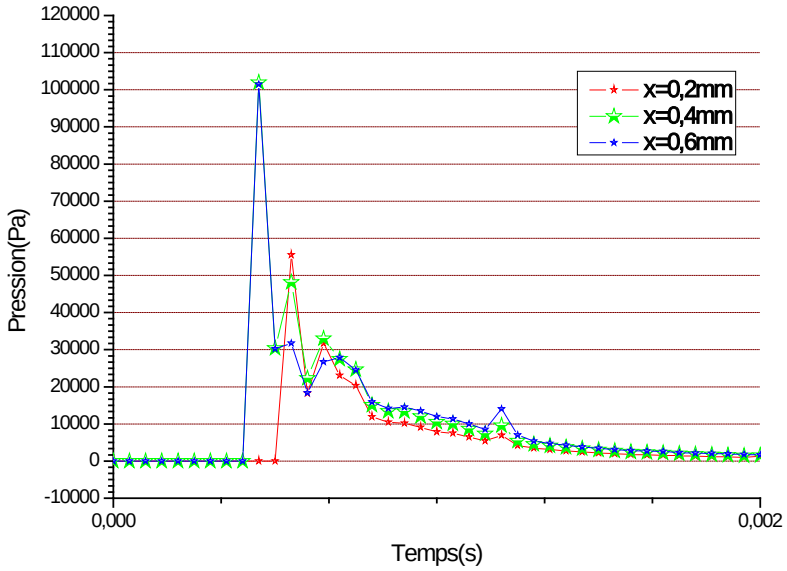


Figure IV-7-3 : la variation de la pression d'impact pour trois points

L'interface particule / substrat

La Figure IV-7-3, illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (101.450 KPa et 101.963 KPa) , où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe ,et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, l'augmentation de pression à l'impact dans le deuxième et le troisième points (x=0.4mm et x=0.6mm) sont plus grande que celle dans le point (x=-0.2mm), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ces points est bonne que dans le premier point.

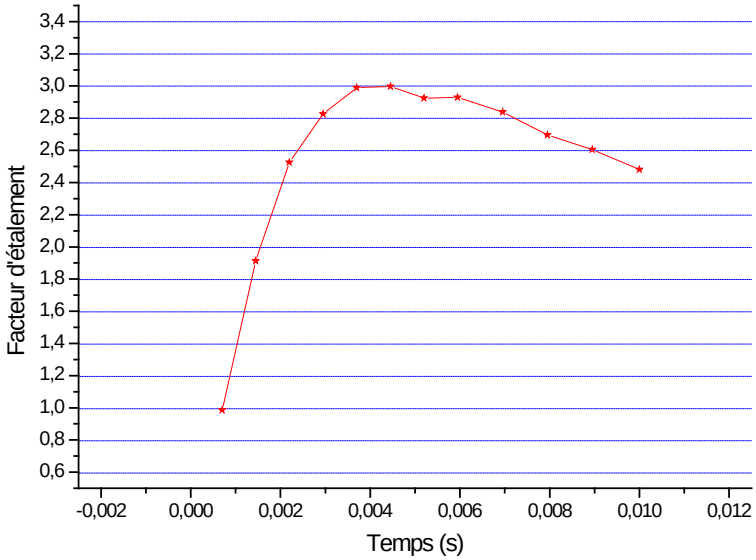


Figure IV-7-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

La figure IV- 7-4, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium, nous notons que ce facteur augmente rapidement aux premiers instants ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande

On remarque aussi que la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale à 2.99 après il se stabilise à une valeur de 2.48.

IV.9 Pour le diametre des pics et creux D=1mm et E=0.5 mm

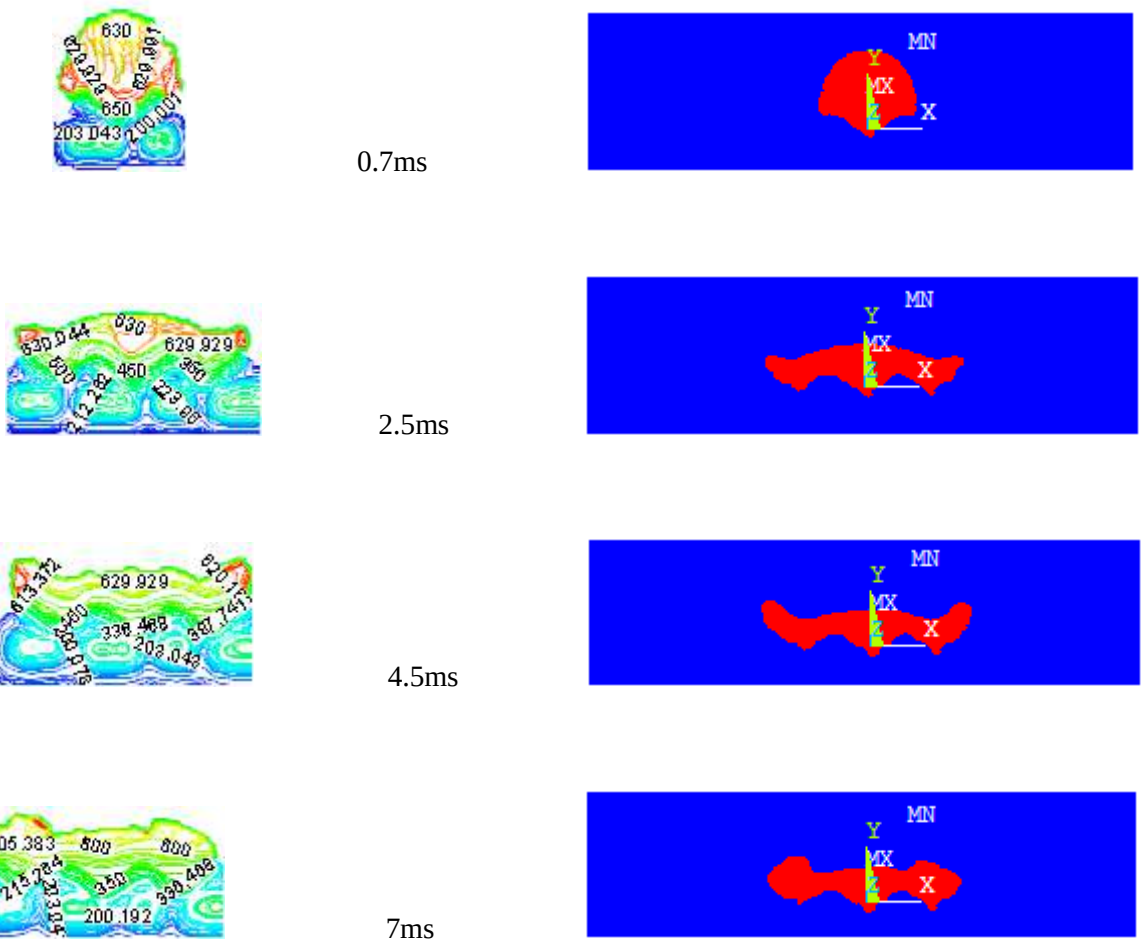


Figure IV-8-1: distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

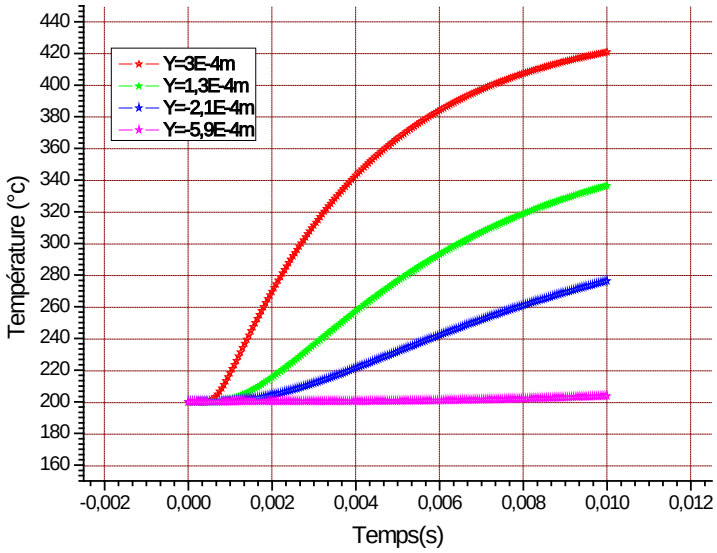


Figure IV-8-2: profiles de température dans le temps pour quatre positions dans Substrat

la Figure IV-8-2représente les résultats numérique des profiles de température en quatre positions dans le substrat, on note que :

- à 0.3mm sous la ligne d'impact, la température de substrat augmente rapidement puis elle se stabilise et reste constante.
- à 0.13mm sous la ligne d'impact, la température s'élève avec un retard de 0.001 seconde et converge vers une valeur 320°c et se stabilise.
- à 0.21mm sous la ligne d'impact, la température monte progressivement avec une faible pente relativement, et se stabiliser ensuite à 280°c.
- à 0.59mm la température reste constant dès le début de l'étalement et elle est égale à sa température initiale de substrat

Finalement on peut dire que la zone infectée thermique est de 0.59 mm.

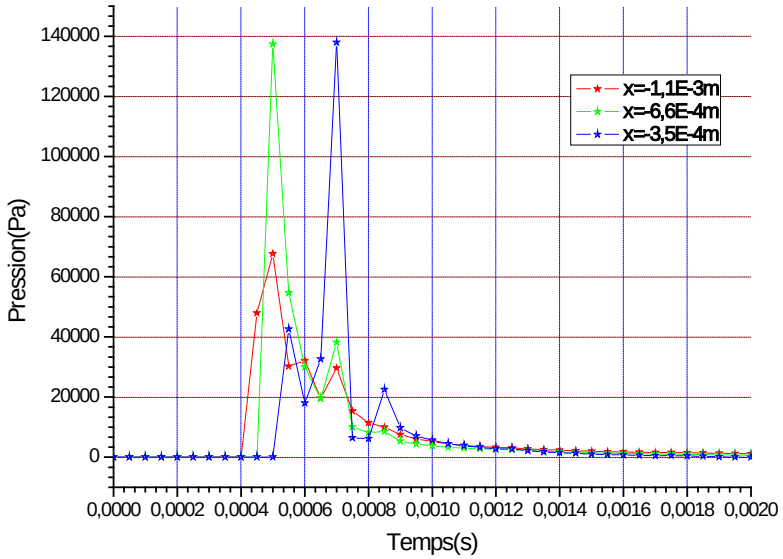


Figure IV-8-3:la variation de la pression d'impact pour trois points

L'interface particule / substrat

Cette figure illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (137.312 KPa et 137.906 KPa), où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe ,et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, , l'augmentation de pression à l'impact dans le deuxième et le troisième points (x=-0.66mm et x=0.35mm) sont plus grande que celle dans le point (x= 1.1mm), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ces points est bonne que dans le premier point.

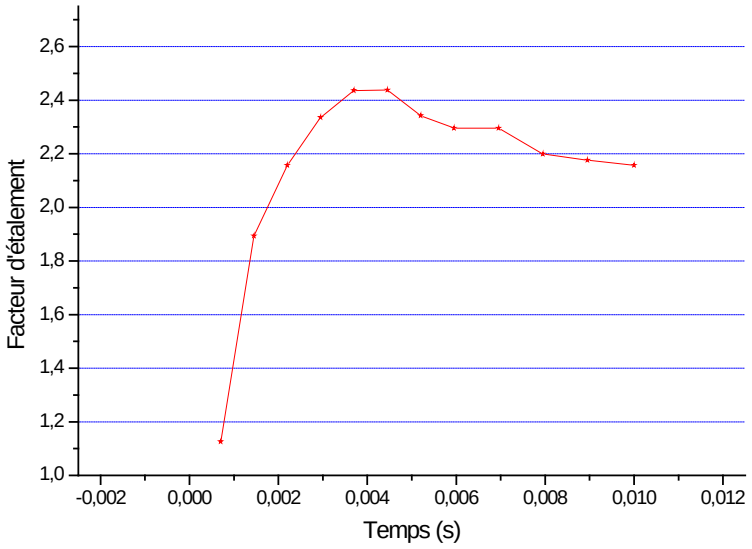


Figure IV-8-4: Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

la figure IV-8- 4, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium nous notons que ce facteur augmente rapidement aux premiers instants ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande ,On remarque que la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 2.43 , après il est diminué pour atteindre la valeur 2.15

IV.10 Pour le diametre des pics et creux D=0.4mm et E=0.5 mm

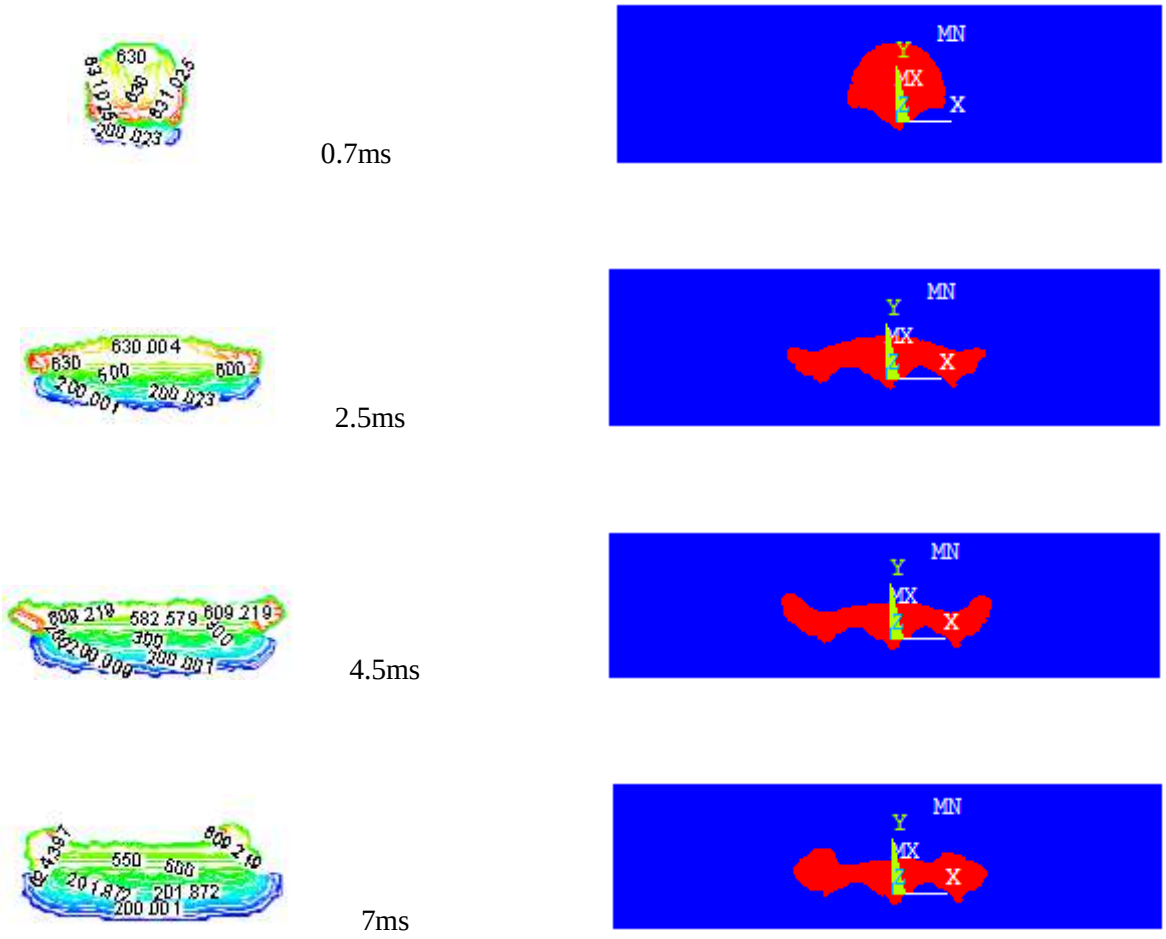


Figure IV-9-1: distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

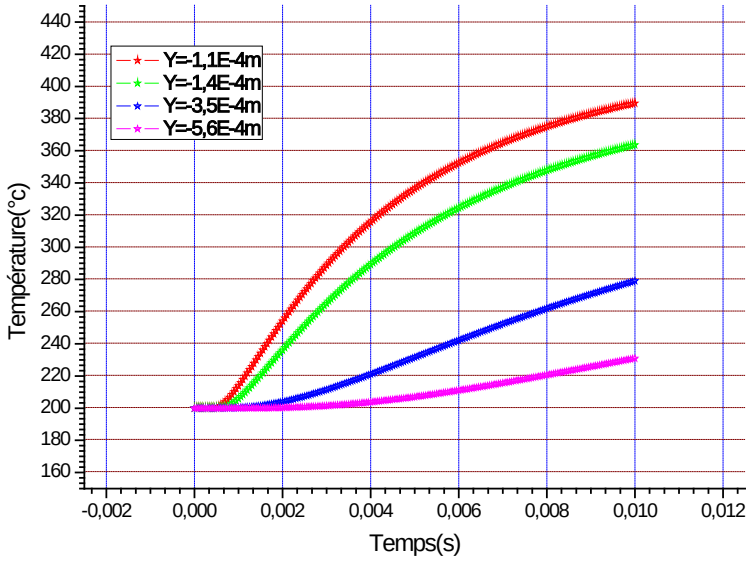


Figure IV-9-2: profiles de température dans le temps pour quatre positions dans substrat

la Figure IV-9-2 représente les résultats numérique des profiles de température en quatres positions dans le substrat, on note que :

- à -0.11mm et -0.14mm sous la ligne d'impact, la température de substrat augmente rapidement puis elle se stabilise et reste constante.
- à -0.35mm sous la ligne d'impact, la température s'élève un peu puis elle se stabilise.
- à -0.56mm sous la ligne d'impact, la température monte progressivement et se stabiliser ensuite.

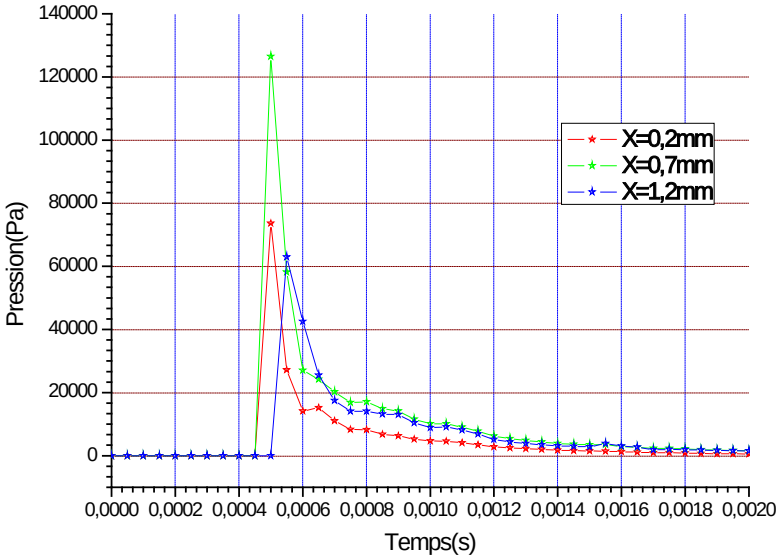


Figure IV-9-3: la variation de la pression d'impact pour trois points

L'interface particule / substrat

Figure IV-9-3 illustre les distributions de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact au cours d'étalement de la goutte initialement la pression est plus élevée au point d'impact égale a (126.436 KPa) , où une bonne adhérence goutte/substrat. La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies,

, l'augmentation de pression à l'impact dans le deuxième point (x=0.7mm) est plus grande que celle dans les points (x=0.2mm , x=0.9mm), se qui favorise la collision de lamelle sur le substrat dans ce cas est bonne que dans les deux autres cas.

Il faut noter ici que la pression intermédiaire est soumise à une faible pression favorisant le décrochage mécanique.

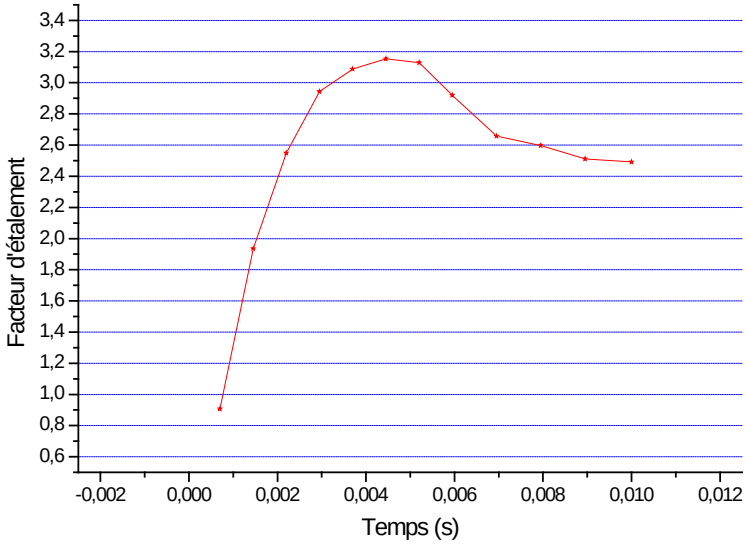


Figure IV-9-4: Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

la figure IV- 9-4, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium nous notons que ce facteur augmente rapidement aux premiers instants ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande ,On remarque que la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 3.15 , après il est diminué pour atteindre la valeur 2.49

IV.10 Comparaison entre les deux cas de diametre

- **pour la température de 1er cas**

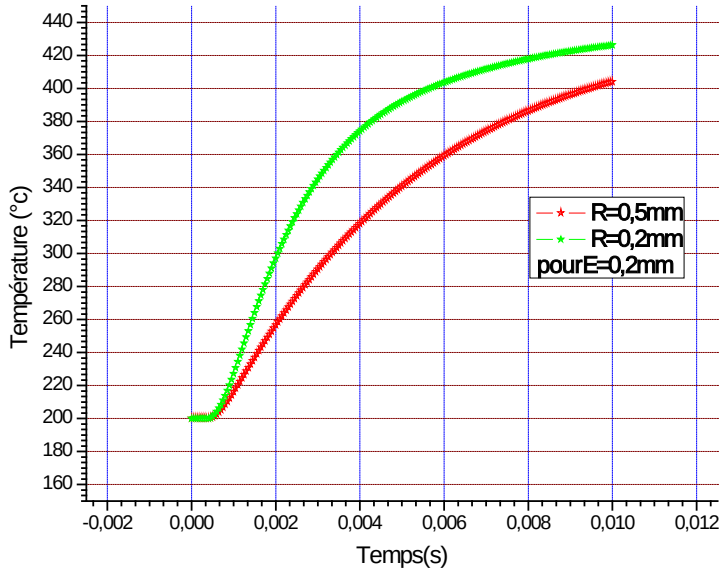


Figure IV-10 profils de température dans chaque (R) pour E=0.2mm

La figure IV-10 représente Les résultats numériques des profils de température dans le temps pour les deux cas de diamètre des pics et des creux au point du contact d'une goutte au cours d'étalement, on note qu'aux les premiers instants du contact de la goutte avec le substrat, Pour le premier et le deuxième cas on observe une augmentation rapide et en parallèle des valeurs de la température puis se stabilisent

❖ **pour la température de 2eme cas**

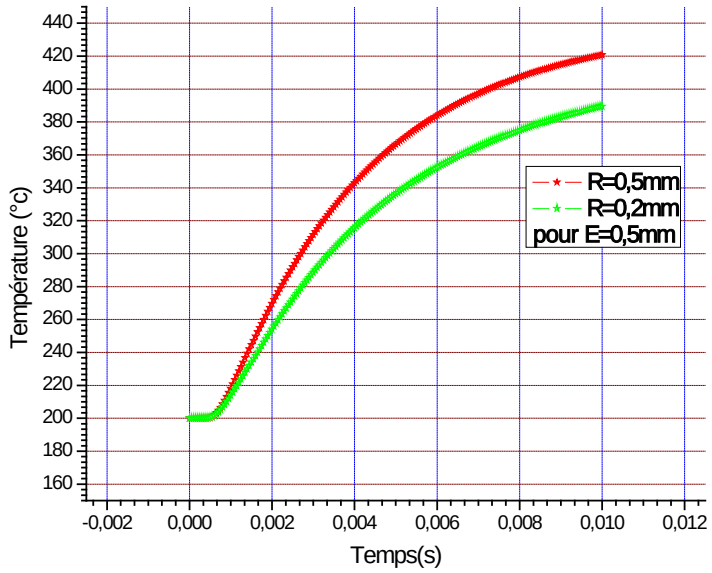


Figure IV-11 : Comparaison entre les profils de température dans chaque (R) pour E=0.5mm

❖ **pour la pression de 1er cas**

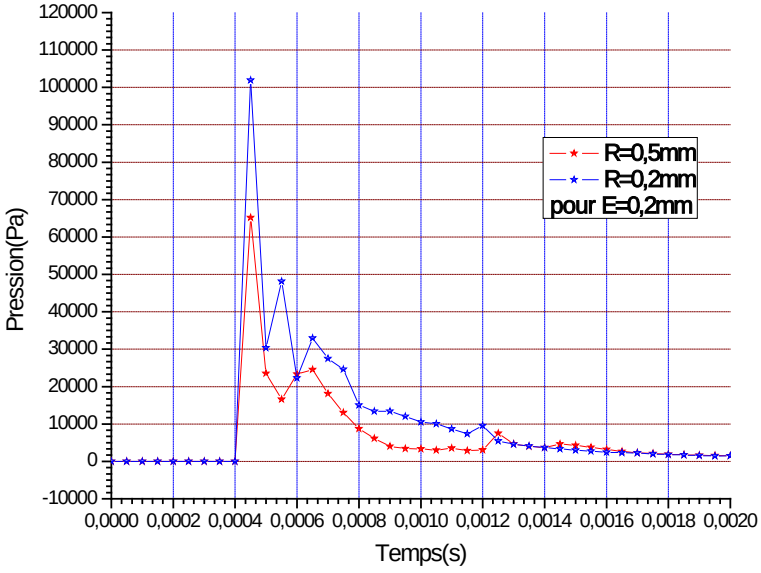


Figure IV-12 : Comparaison entre les profils de pression dans chaque (R) pour E=0.2mm

La figure IV-12 représente les résultats numériques des profiles de pression dans le temps pour les deux cas de diamètre des pics et des creux au point du contact d'une goutte au cours

d'étalement, Nous remarquons initialement la pression est plus élevée au point d'impact, où la pression pendant le deuxième cas (101.963 KPa) est plus élevée que celle du première cas (65.163 KPa) , cette augmentation conduit à une bonne adhérence goutte/substrat , et donc une diminution de la résistance thermique de contact , après un très court temps la pression est abaissé alors que la résistance thermique de contacte augmente, cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat ,et donc les particules sont rapidement refroidies .

- **pour la pression de 2eme cas**

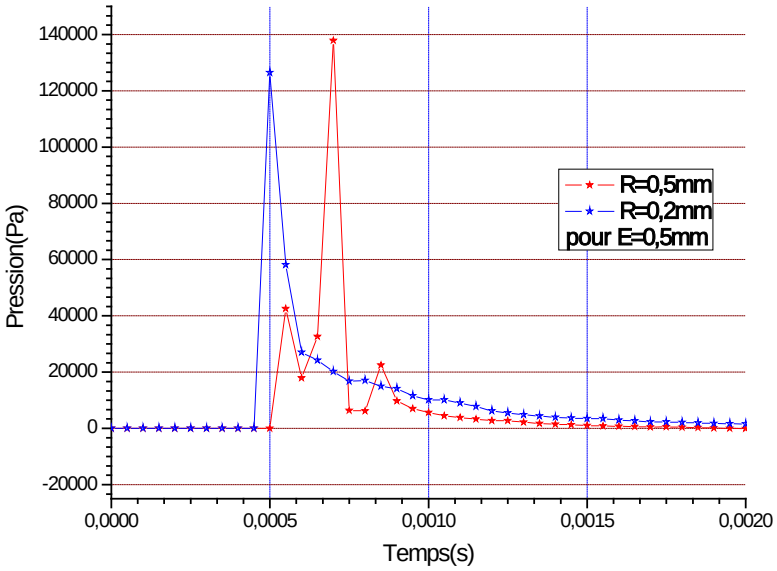


Figure IV-13 :Comparaison entre les profils de pression dans chaque (R) pour E=0.5mm

La figure IV-13 représente les résultats numériques des profiles de pression dans le temps pour les deux cas de diamètre des pics et des creux au point du contact d'une goutte au cours d'étalement, Nous remarquons initialement la pression est plus élevée au point d'impact, où la pression pendant les deux cas(137.906 KPa et 126.436 KPa respectivement) , cette augmentation conduit à une bonne adhérence goutte/substrat , et donc une diminution de la résistance thermique de contact , après un très court temps la pression est abaissé alors que la résistance thermique de contacte augmente, cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat ,et donc les particules sont rapidement refroidies,

❖ **pour les facteurs d'étalement de 1er cas**

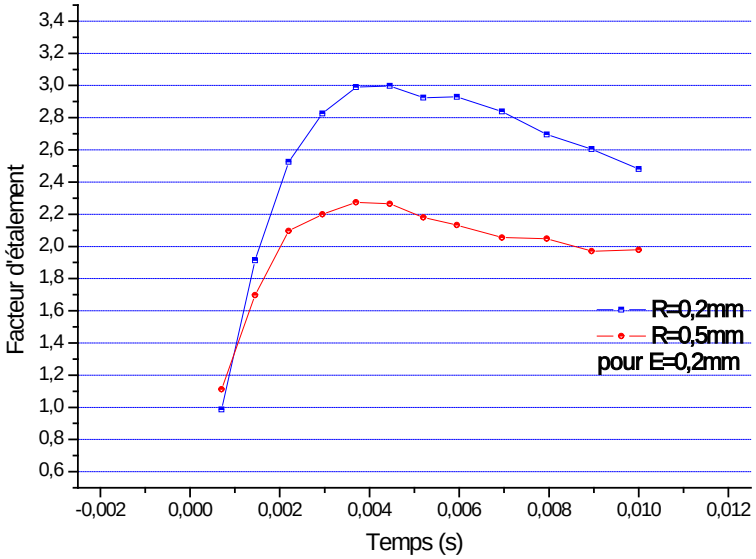


Figure IV.14. Comparaison entre les facteurs d'étalement dans chaque (R) pour E=0.2mm

la figure IV- 14, représente L'évolution de facteur d'étalement de la goutte d'aluminium pour les deux cas ,nous notons qu' aux premiers instants, ces facteurs augmentent rapidement ce qui signifie que la goutte s'étale avec une vitesse radiale très grande.

Si on comparant les deux courbes nous allons remarquer que dans premier cas (R=0.2mm) la valeur du facteur d'étalement atteint son maximum qui est égale 2.99 alors que dans deuxieme cas elle atteint son maximum 2.27

Après ils sont diminuent pour atteindre les valeurs 2.48, 1.97 respectivement

❖ **pour les facteurs d'étalement de 2eme cas**

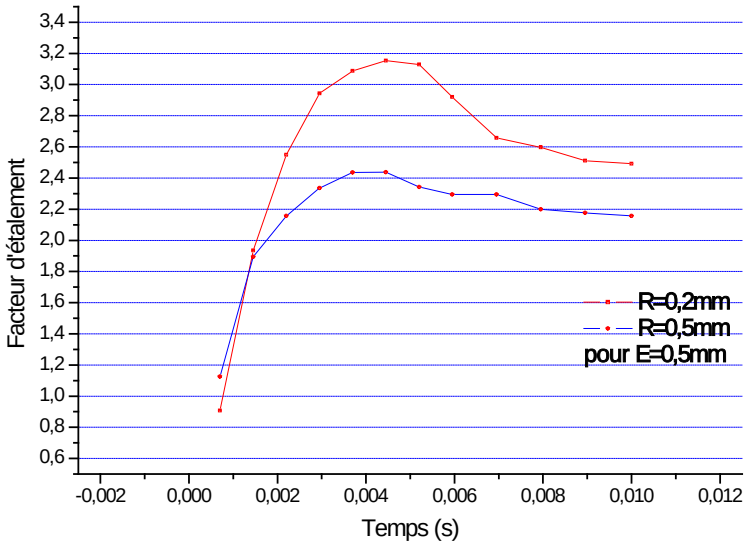


Figure IV.15. Comparaison entre les facteurs d'étalement dans chaque (R) pour E=0.5mm

Conclusion

Ce chapitre traite de la simulation numérique de l'impact de goutte d'alumine de taille millimétrique sur un substrat en acier. En comparant les courbes numériques et expérimentales de l évolution de la température et de la pression du substrat,

Par cette étude on peut tirer les point important qui influence l'étalement et la solidification, de goutte d'aluminium sur une surface de substrat d'acier représentant des aspérités surfacique :

- La pression d'impact de la particule est liée à l'adhérence au substrat,
- Ce pendant les particules impactant sur une surface avec aspérités égale à 0.5mm génèrent une pression relativement importante ,qui joue un rôle très important sur la qualité de l'adhérence et donc sur la formation de la lamelle finale

- dans le deuxième cas, ou on a varie la distance inter –aspérité la pression est plus élevée au point d'impact, ou il se produise une bonne adhérence entre de goutte /substrat proportionnellement avec la distance.

- Le préchauffage du substrat à mis en évidence la qualité du contact thermique entre la goutte et le substrat, par une résistance thermique de contact faible.

- La formation de lamelle dans le deuxième cas est bien étalée, donc le diamètre et la distance entre les pics et les creux jouent un rôle important sur la formation de lamelle.

Conclusion générale

Ce travail s'intéresse à l'expérience numérique de la formation de lamelle, dans un procédé de revêtement et qui possède une grande importance dans l'industrie, parmi les matériaux utilisés dans ce procédé on cite l'aluminium, un matériau fortement utilisé dans les barrières thermiques, l'isolation électrique….
Expérimentalement en raison des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la microseconde et du micromètre.il est donc nécessaire de faire appel à des outils numériques complexes pour prendre en compte les divers aspects thermiques et dynamiques.

- Dans un premier chapitre, on a étudié la projection thermique, ses paramètres et ses caractéristiques, avec un état de l'art sur le sujet de l'impact d'une goutte sur substrat et les études sur la physique associée .les phénomènes hydrodynamiques et thermiques qui interviennent dans le comportement d'une particule fluide isolée qui sont nombreux et suscitent encore de nos jours des interrogations

- Dans le deuxième et troisième chapitre, on a décrit les équations et les méthodes numériques qui expliquent le phénomène physique de l'étalement avec solidification des particules sur substrat.

- Dans le dernier chapitre, on a fait la simulation en 2D cartésien sur un cas de validation afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, puis sur l'impact oblique des gouttes pleine , les résultats obtenues montrent que les deux paramètres jouent un rôle important sur la morphologie finale du lamelle, la projection de particule(goutte) sur un substrat est une technique largement utilisée dans l'industrie .cependant les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont pas très bien maitrisés puisque l'état de la matière, la solidification ainsi que la refusions éventuelle par interaction particule substrat sont difficiles à analyser.

Les résultats numériques ont montré que la forme de la substrat joue un rôle important pour son étalement, donc le diamètre et le vide entre les pics et les creux a une influence plus importante.

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

Les References

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

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

[3]M. Xue, Y. Heichal, S. Chandra, J. Mostaghimi, « Modeling the impact of a molten droplet on a solid surface using variable interfacial thermal contact resistance", J. Mater sci. (2007) 42: 9-18

[4] A.M. Ahmed, R.H. Rangel, V.V. Sobolev, J.M. Guilemany, In-Flight Oxidation of Composite Powder Particles During, Thermal Spraying, Heat and Mass Transfer, 44, 2001, p. 4667-4677

[5] L. Xu, W. Zhang, S. Nagel. Drop splashing on a dry smooth surface. Phys Rev Lett 2005. 94 (18) No. 184505.

[6] http://www.tcpp.fr/html/projectionthermique.htm

[7] E. Harscoet and D. Froelich, "Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA)", J. Clean. Prod., 16(12), p 1294-1305,2007
[8] http://www.advanced-coating.com/projection-flamme.htm

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

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

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

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

[13] S. Beauvais, Thèse doctorat : « Etude de l'influence de la porosité sur les propriété électriques de dépôts réalisés parprojection plasma », Ecole de Mines de Paris, 2003

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

[15] Weston M. Stacey. (ed.), "Fusion Plasma Physics". WILEY-VCH Verlag GmbH &Co. Georgia, 2005.
[16] C. BAUDRY. Thèse doctorat : « Contribution à la modélisation instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma », Université de Limoges, 2003

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

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

[19] P. Fauchais, M. Vardelle, J. F. Coudert, A. Vardelle, C. Delbos, J. Fazilleau, Thermal plasma deposition from thick to thin coatings and from micro- to nano-structure, Pure Appl. Chem., 77 (2), p 475–485, (2005) .

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

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

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

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

[24] E. Leveroni and E. Pfender, A unified approach to plasma particle heat Transfer Under non continuum and non-equilibrium conditions. Int. Journal of Heat and Mass Trans., vol.33 (1990), 1497-1509.

[25] http://www.tcpp.fr/html/preparationsurface.htm . /2015

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

[27] A. Ohmori, C.J. Li, The structure of thermally sprayed ceramic coatings and its dominant effect on the coating properties, in Plasma Spraying-Theory and Applications, (ed.) R. Suryanarayanan, (pub.) World Scientific Pub. Co., Singapore, 1993, pp 179-202.

[28] P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoub, Quo vadis thermal spraying?, J. Thermal Spray Technology, 10 (1),
2001, pp 44-66.

[29] H. Nakahira, K. Tani, K. Miyajima, Y. Harada, Anisotropy of thermally sprayed coatings, in Thermal Spray:
International Advances in Coatings Technology, (ed.) C.C. Brendt, (pub.) ASM International, Materials Park,
OH, USA, 1992, pp 1011-1017.

[30] R. McPherson, The relationship between the mechanism of formation, microstructure and properties of
plasma sprayed coatings, Thin Solid Films, 83, 1981, pp 297-310.

[31] V. V. Sobolev, J. M. Guilemany, Flattening droplets and formation of splats in thermal spraying: A reviewof recent work – Part 1, J. Thermal Spray Technology, 8 (1), 1998, pp 87-101.

[32] V. V. Sobolev, J. M. Guilemany, Flattening droplets and formation of splats in thermal spraying: A review
of recent work – Part 2, J. Thermal Spray Technology, 8 (2), 1999, pp 301-314

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

[34] H. Fukunama, A. Ohmori, Behavior of molten droplet impinging on flat surfaces, in Thermal Spray:Industrial Applications, (ed.) C.C. Brandt and S. Sampath, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA,1994, pp 563-568.

[35] R.C. Dykhyizen, Review of impact and solidification of molten thermal spray droplets, J. Thermal Spray
Technology, 3 (4), 1994, pp 351-61.

[36] C. Escure, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Visualization of the impact of drops on substrate in
plasma spraying: Deposition and splashing mode, in Thermal Spray 2001: New surfaces for new millennium,
(ed.) C. C. Brendt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp
805-812.

[37] P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoub, Quo vadis thermal spraying?, J. Thermal Spray Technology, 10 (1),2001, pp 44-66.

[38] Fukumoto M., Shiba M., Haji H., Yasui T., "Three-dimensional transition map of flattening behaviour in the thermal spray process", Pure Appl. Chem., Vol. 77 (2) pp. 429-442. (2005)

[39] Syed Asif Ansar Co-projection d'alumine ET d'acier inoxydable par plasma d'arc, University of New York at Stony Brook, USA, 2004

[40] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron and P. Fauchais "Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation", Thermal Spray Solutions, Advances in technology and application, Osaka, Japan. ISBN 3-87155-792-7, 2004

[41] CARREROT. H."Etude du comportement mécanique de dépôt céramique projeté par plasma pour application orthopédiques", Thèse de l'Ecole des mines de Saint Etienne, 1991

[42] TUCKER. R. C. "Structure propriety relation ships in deposits produced by plasma spray and detonation gun techniques", J. Vac. Technol, n°11, pp 741-746, 1974

[43] VARDELLE. A., VARDELLE. M., FAUCHAIS. P. "Ifluence of velocity and surface temperature of alumina particles on the proprieties of plasma sprayed coating", Plasma Chemistry an Plasma Processing , pp 255-291, 1982

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

[45] R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S. Chandra, M. Charmchi (2003) J Therm Spray Technol

[46] F .Ben ettouil(2008) " Modélisation raide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc " thèse de doctorat a Université de Limoges.

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

[48] F. Ben Ettouil, B. Pateyron, H Ageorges, M.El Ganaoui, P. Fauchais, O.Mazhorova Fast modeling of pahse change in a particle injected within a.d.c.plasma jet J. thermal Spray technology, 16,2007,744-750.
[49] V.R.Voller. (1990)Fast implicit finite difference method for the analysis of phase change problems.IMA Journal of Numerical Analysis, 30:875-898.

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

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

[52] Lotfi. Chouikhi (palier à lévitation magnétique:modélisation et optimisation) mémoire de magistère .université de constantine.2002

[53] Ali.rezik (étude comparative des différents modèles éléments finis pour le calcul des forces d'origine magnétique) mémoire de magistère 'université de Jijel ,2002.

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

[55] B. Ramaswamy & M. Kawahra. Lagrangian fintie element analysis applied to viscousfree surface fliud flou. Int. J.Numer. Methods fluids, vol.7, p.953-984, 1987.

[56] M.R. Maxey and J.J. Riley. Equation of motion for a small rigid sphere in a non uniform flow. PHYS. FLUIDS, 26:2883 – 2889, 1983.

[57] W.J. Rider and D.B. Kothe. Stretching and tearing interface tracking methods. 12th aiaa cfd conference paper, 1995.

[58] D. Magnaudet and J. Fabre M. Rivero. Accelerated flows around a rigid sphere or a spherical bubble. part 1: Steady straining flow. J. Fluid Mech., 284:97 – 136, 1995.

[59] B.J.Daly .A technique for incuding surface tension eects in hydro dynamic calculations. J. Comput. Phys, vol.4, p.97-117, 1969

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

[61] M.Pasandideh-Fard,s.D.Aziz,S.chandra,javad .Mostaghimi numerical simulation of thermal spray coating formation ,in proceeding of the 1 st international thermal spray conference ,Montreal ,Quebec,may 8-11.

[62] Pershin, I. Thomson, S. Chandra, J. Mostaghimi, Splashing of nickel droplets during plasma spraying, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research.

[63] 378 J. Madejski, Solidification of droplets on a cold surface, Int. J. Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp 1009- 1013.

[64] Minxia Xue . Yoav Heichal . Sanjeev Chandra . Javad MostaghimiModeling the impact of a molten metal droplet on a solid surface
using variable interfacial thermal contact resistance

[6**5]** M. Zirari (2011) “Modélisation de la construction d’un dépôt par projection thermique : De la formation d’une lamelle à l’empilement des couches, thèse de doctorat