République Algérienne Démocratique & Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MÉDÉA

Faculté de technologie

Département de génie mécanique

Projet fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master

En Génie Mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

Thème

Influence de la distance inter-particules lors de l'impact sur l'interaction dynamique et thermique de formation de lamelle

Présenter par :

- DEBBAZI ABD ELKADER
- DEHIM Mohamed amine

proposer et diriger par :

Dr : ZIRARI Mounir

2016/2017

REMERCIMENTS

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

Tout au long de nous années d'étude

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

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

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

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

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

Amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chers frères et chères sueurs.

A toutes les familles DEBBAZI, et ainsi que tous proches.

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

DEBBAZI ABD ELKADER

Dédicace

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

amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chers frères.

A mes chères soeurs.

A toute ma famille.

A tous mes profs qui nous a appris.

A mon cher Binôme DEBBAZI AEK

A mes chers amis ,

A toutes la promo Master génie mécanique 2016/2017.

*A tous ceux que j'*aime *et qui m'*aiment.

Dehim med amine

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction ……2

I.1.Projection thermique……2

I.2. Techniques de projection thermique ……2

I.3.Les domaines d'application…… ...3

I.4.Présentation générale des procédés de projection thermique ……...3

I.5.Les types de projection thermique……...4

I.5.1. La projection à la flamme ……..4

I.5.1.1.Projection flamme poudre…….....5

I.5.1.2 .La projection flamme-fil ……6

I.5.1.3 .La projection supersonique par combustion ……6

I.5.1.4.Canon à détonation……..7

I.5.2.Projection par arc électrique……8

I.5.2.1 La projection arc-fil……...8

I.5.2.2 La projection par plasma d'arc soufflé……9

I.5.3.La Projection plasma……...10

I.5.3.1 Fonctionnement de la torche à plasma d'arc ……...10

Torche à arc transféré……...10

Torche à arc soufflé ……10
I.5.3.1.1. Amorçage de l'arc……11
I.5.3.1.2 .Le gaz plasmagène ……11
I.5.3.1.3. L'injection des gaz plasmagènes……..14
I.5.3.2. Formation du jet plasma…….…….15
I.5.3.3. Ecoulement du jet plasma……16
I.5.4. Traitement des particules dans le jet plasma……17
I.5.4.1 .Injection de la poudre ……...…17
I.6. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat……..18
I.6.1.Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat…… ……...19
I.6.2.Etalement de la particule ……..20
I.6.3.La Solidification des lamelles ……..22
I.7. Caractéristiques microstructurales des revêtements ……22
I.7.1. Dépôts d'alumine ……23
I.8. Substrat……..24
I.8.1. Préparation de substrat……..24
I.9.L'état de l'art……...25

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

Introduction…….26
II.1. écoulements bi phasiques…….26
II.1.1.Modélisation bi phasique liquide/solide ……26
II.2 .model dynamique ……27
II.2.1. Modélisation de l'écoulement des fluides ……..27
II.2.1.1. L'équation de la continuité ……28
II.2.1.2. L'équation de quantité de mouvement ……28
II.2.1.3. Équation de l'énergie ……...28
II.3. Modèle thermique ……29
II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase ……29

II.3.1.1. Méthode à grille mobile ……..30

II.3.1.2. Méthode à grille fixe ……30

II.3.1.2.a. Méthode d'enthalpie……..31

II.3.1.2.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente……32

II.3.2. Modèle thermique utilisé…….32

II.4.Calcul d'interfaces ……...……33

II.4.1La méthode lagrangienne ……33

II.4.2 .La méthode eulérienne ……..34

II.4.2.1. Les méthodes de suivi de front ……34

II.4.2.2. Les méthodes de suivi de volume ……35

II.4.3. La Méthode VOF …….....36

II.5.Conclusion…….39

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

Introduction……..…40

III.1. méthodes de discrétisation :……40

III.1.1 Les trois grandes familles de méthodes ……40

III.1.1.1 Méthode des différences finies ……41

III.1.1.2. Méthode des volumes finis ……41

III.1.1.3.Méthode des éléments finis ……....42

III.1.1.3.1 .Démarche éléments finis……42

III.1.1.3.2. Présentation de la méthode…… ……43

III.2. Résolution des équations par éléments finis……43

III.2.1IntroductionMéthodes des éléments finis……43

III.2.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis……44

III. 2.2.1Formulation vibrationnelle forte……44

III.2.2.2. Formulation variation elle faible……44

III.3. Forme généralisée des équations du système……45

III.4.choix d'un maillage……46

III.4 .1.discrétisatio……..47

III.4.2. Terme temporelle……47

III.4.3. Terme advection……49

III.4.3.1Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)……49

III.4.3.2. Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)……51

III.4.3.3 Approche Colloquée De Galerkin (COLG)……51

III.4.4. Terme de Diffusion……52

III.4.5. Termes source……52

Conclusion ……53

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction ……...54

IV.2 ANSYS ……...54

IV.3. Matériaux utilisé ……57

IV.3.1. L'aluminium ……...57

IV.3.2. récapitule les prospérités des mâtereaux utilisés dans la simulation ……..58

IV.4. Identification ……..59

IV.4.1. impact d'une particule d'aluminium totalement fondue …….....59

IV.5 Description du domaine d'application …….....65

IV.6 Comparaison entre les 4 cas ……77

IV.7 Comparaison entre les 4 cas ...……78

IV.8 Conclusion ..……..80

CONCLUSION GENERAL……81

REFERENCES…….....82

Résume

Résume de projet

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux, relatifs principalement à la nature du matériau à projeter, la source de chaleur, l'atmosphère environnante, le substrat. Les interactions entre phases solides et liquides et entre gouttes qui s'écrasent simultanément sur la surface solide l'une à cote de l'autre posent question, parce qu'elles modifient la morphologie d'impact. Afin de mieux comprendre le phénomène d'impact de gouttes multiples. On a étudié numériquement l'impact simultané sur un substrat lisse de deux gouttes identiques où on à trouver que la densité de particule dans le jet influence considérablement la formation de lamelle.

Mots clés :

Dépôt, lamelle, impact, simultané, substrat, VOF, changement de phase, chaleur spécifique équivalant, éléments finis, simulation, numérique, ANSYS 2011.

ملخص المشروع

تعتمد مورفولوجيا و إيداع الخصائص على عدد من الضوابط التجريبية ، تتعلق أساسا بطبيعة المادة المأخوذة , مصدر الحرارة, الغلاف الجوي المحيط بها والركيزة. التفاعلات بين المرحلة الصلبة والسائلة وبين القطرات التي تسقط, في وقت واحد على سطح صلب (الركيزة) واحدة بجانب الأخرى والتي تستوجب من خلالها طرح إشكالية من اجل الفهم الجيد لظاهرة التأثير في حالة استعمال القطرات المضاعفة.في هذه المذكرة قمنا بالدراسة العددية في الحالة التي يتم استعمال قذف قطرات مضاعفة ومتشابهة في وقت واحد على ركيزة ملساء ,حيث وجدنا أن كثافة الجسيمات في حالة القذف لها تأثير كبير على تشكل الصفيحة.

كلمات البحث:

الإيداع , الصفيحة , تأثير,في وقت واحد, الركيزة,VOF , مرحلة التغير ,الحرارة النوعية المعتدلة , العناصر المتناهية , محاكات , الرقمية , ANSYS 2011.

Project summary

The morphology and properties of deposits depend on many experimental, mainly relating to the nature of the material to project, the source of heat, the atmosphere intoxicate the substrate. The interactions between solid and liquid phases and between drops that spread simultaneously on the solid surface side by side is questionable because they modify the morphology of impact. To better understand the impact phenomenon of multiple drops. The simultaneous impact on a smooth substrate of two identical drops was studied numerically, where it was found that the particle density in the jet considerably influences the formation of a lamella

Keywords:

Deposit, lamella, impact, simultaneous, substrate, VOF, phase change, specific heat equivalent, finite elements, simultaneous, digital, ANSYS 2011.

LISTE DE FIGURES

Figure I.1 : Principe fondamental de la projection thermique …….2
Figure I.2 Schéma de principe de la projection thermique. ……... 3
Figure I-3 : Les types de la projection thermique ……... 4
Figure I-4: Projection à la flamme ……...5
Figure I-6: Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre …….....5
Figure I-7 *:* Le principe de la projection flamme fil ……... 6
Figure I-8: schéma du procédé HVOF ……7
Figure I-9 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation …….…….8
Figure I.10 : Principe de fonctionnement de l'arc fil……... 9
Figure I.12 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé……..10
Figure I-13 : Torche plasma à arc transféré……...11
Figure I.14: Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma…….11
Figure I.15: Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes……...…….. 12
Figure I.16: Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes……. 13
Figure I.17: Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes…… 14
Figure I.18: schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma ……...…15
Figure I.19.Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche Plasma à courant continu…… 16
Figure I.20.Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc ……..….16
Figure I.21.Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé ……17
Figure I.22: schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale) ……..…18

Figure I.23 : Modes d'impact…… .20
Figure I.24: Schéma d'écrasement de la particule ……. 21
Figure I.25 : Influence de vitesse et température des particules d'alumine projetées par plasma avant impact sur la morphologie des lamelles

Figure I .26 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma ……..... 23

Figure I.27 : Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) Du dépôt d'alumine élabore a 573 K ……. ……..24

Figure II.1 Répartition des phases pour trois problèmes bi phasiques types : A Mélange homogène ; B Répartition statique des phases ; C Problème dynamique de type changement de phase ……..…….....28

Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température ……...32

Figure II.3: Présentation des méthodes de calcul d'interface …….. ...34

a) méthode Lagrangienne, b) méthode Eulérienne,

Figure II.4: Différentes méthodes de suivi de front …….35

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

Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque……36

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

Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret …….36

Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique…37

Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps …...38

Figure III.1 : méthode de discrétisations ……..…..41

Figure III-2 (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique…….48

Figure III.3 l'approche de ligne de courant d'Upwind ……... 50

Figure III.4 bilan thermique …… …….54

Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSY ……57

Figure IV– 2 **:** configuration géométrique et conditions d'étalement L'identification…..…..60

Figure IV.3 : impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement 61

Figure IV.4: comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions ……62

Figure IV-5:la variation dans le temps de la pression d'impact à l'interface Particule substrat63

Figure IV-6 : profiles de température en fonction de temps pour Cinque position Au long de substrats verticalement……..…63

Figure IV-7: distribution de la température lors de l'impact d'une particule d'aluminium initialement avec une vitesse de 3 m/s et une température de630℃ sur un substrat initialement a 200℃. ……..…..64

Figure IV.8 **:** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C ……..….65

Figure IV-9 : profiles de température avec le temps premier *cas* ……..……..…67

Figure IV-10: la variation de la pression au point d'impact pour le premier cas ……...68

Figure IV.11 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C ……..68

Figure IV-12 : profiles de température avec le temps dans le deuxième cas……70

Figure IV-13: la variation de la pression au point d'impact Pour le deuxième cas ……....70

Figure IV.14 :distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C ……...……72

Figure IV-15 : profiles de température avec le temps dans le Troisième cas ……..73

Figure IV-16: la variation de la pression au point d'impact Pour le Troisième cas ……..…74

Figure IV.17 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C ……...…74

Figure IV-18 : profiles de température avec le temps dans le quatrième cas ……..75

Figure IV-19 : la variation de la pression au point d'impact Pour le quatrième cas ……..76

Figure IV-21 : Comparaison entre les profils de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas……80

Figure IV-22: Comparaison de la variation de la pression au point d'impact Pour les quatre cas……..80

LISTE DES TABLEAUX

- **Tableau III.1 :** Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[75].**
- **Tableau IV.3.2.** le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation :
- **TableauIV-20 *:*** tableau de Comparaison des profils de température des quatre cas (tecplot).
- **TableauIV-20 *:*** Comparaison de la dynamique de l'impact dans les quatre cas *(ANSYS).*

NOMENCLATURE

- **A :** l'aire de la particule perpendiculaire à l'écoulement……..m^2
- **B :** surface d'échange……..m^2
- **C_D:** Le coefficient de traînée
- **C_{ds}**: Coefficient d'émission de la surface (C_{ds}= 1 pour un corps noir, C_{ds}<<1 corps brillant)
- **C_p :** La chaleur spécifique……J.kKg^{-1}.K^{-1}
- **C:** Coefficient d'advection transitoire.
- **$C_{2\tau}$:** Coefficient global réglé à 1,0.
- **D** : l'indice de la valeur on niveau du noeud aval.
- **dt**: Temps élémentaire en……..s
- **d_p:** Le diamètre de la particule……..m
- **dp**: Le diamètre de la particule……..m
- $\frac{dt}{dx}$**:** Gradient de température en x en…….K.m-1
- dQ: Énergie élémentaire en……J
- **E** : l'émissivité de la particule
- **F_D:** La force de traînée exercée par le fluide sur la particule……N
- **h** : le coefficient de transfert thermique……W.m-2.K-1
- **h**: longueur d'élément le long de la direction d'advection……m
- $\overline{K}$ **:** La conductivité moyenne intégrée……..W.m^{-1}. k^{-1}
- **K :** Nombre de Sommerfeld à l'impact
- **K_f:** Paramètre de splashing d'étalement

- **K_{th}:** La conductivité thermique……..W .m^{-1}.k^{-1}
- **K_n:** Le nombre de Knudsen,

- **K_p:** La conductivité thermique du matériau……..W.m^{-1}.k^{-1}

- **Nu :** le nombre de Nusselt
- **P :** La masse volumique du fluide ……kg.m^{-3}
- **p_r**: Le nombre adimensionnel de Prandtl (de l'ordre de 0,5 à1).
- **R_e:** Nombre de reynolds
- **S_Φ:** Termes source.

- T_p: La température du plasma loin de la particule……..K^{-1}
- **Ts** : La température de la particule
- t_S**:** Température de surface du corps……K
- T_∞ : La température du plasma……K
- **Tα** : La température ambiante……K
- **U** *:* la composante axiale de la vitesse du gaz……..$m.s^{-1}$
- U_P**:** La composante axiale de la vitesse de la particule……...$m.\ s^{-1}$
- U_R**:** Permet également de définir le nombre de Reynolds des particules
- **μ***:* la viscosité du plasma……$kg.m^{-1}.s^{-1}$
- **V** : La composante radiale de la vitesse du gaz……..m/s
- V_r**:** La vitesse relative fluide/particule……$m.s^{-1}$
- V_p**:** La composante radiale de la vitesse de la particule……..m/s
- W^e**:** La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de
- W_e: Nombre de Weber
- ***Z***: section en……m^2
- Δ_s: La distance du point situé en amont à l'aval du nœud……m

- **Φ**: Variable généralisée
- **Δ** *:* coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark
- **λ:** Le libre parcours moyen……..m
- **γ***:* le terme correctif.
- $\Gamma_{ø}$*:* Coefficient de diffusion.
- **σ**: Constante de Stephan Boltzmann 5.67 10-8……..$W.m^2.K^{-4}$
- σ_S**:** La constante de Stephan-Boltzmann……..$W.m^{-2}.K^{-3}$
- ρ_g: La masse volumique du gaz……$kg.m^{-3}$
- **ε***:* Degré d'étalement
- ε_m**:** Degré d'étalement maximum

Introduction générale

La technologie de projection thermique est une solution éprouvée et reconnue pour des applications mécaniques, thermiques, et de génie électrique lesplus diverses. Bien que d'application courante depuis trente ans dans les domainesaéronautique et spatial ainsi que nucléaire, elle n'est présente que maintenant dans le secteurde l'automobile, des textiles, de la chimie, de la pétrochimie, de l'électronique et dubiomédical.

La projection thermique est un procédé dans lequel les matériaux solides sont chauffés chimiquement (combustion) ou électriquement par des arcs électrique ou par des jets de gaz Chauffées par des arcs, ensuite accélères par les jets de gaz créant des aérosols fondus se déplaçant à des grandes vitesses. Ces aérosols sont diriges sur la surface cible ou les particules Fondus individuelles viennent s'écraser, se refroidissent et se solidifient pour former un Revêtement protecteur

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact simultané et l'étalement couplé au refroidissement avec solidification, pour se faire nous avons choisi un jet des particules fluide en aluminium totalement fondues (deux gouttes identiques) sur un substrat lisse.

Notre travail est présenté en quatre chapitres

- ✓ Le premier chapitre consiste en un rappel bibliographique sur la projection thermique est ces différents procédés, l'écoulement du jet plasma ainsi que l'impact, l'étalement et la solidification de la lamelle il concerne également les caractéristiques du dépôt.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré à 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 dernier chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact simultané deux gouttes obtenus par le code de calcule ANSYS (2011).

CHAPITRE1

❖ Introduction :

Dans ce chapitre en présentant la définition de projection thermique avec les applications et les principes des différents types, ainsi que les domaines d'utilisation et les phénomènes intervenant lors de la projection des particules.

❖ I.1.Projection thermique :

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

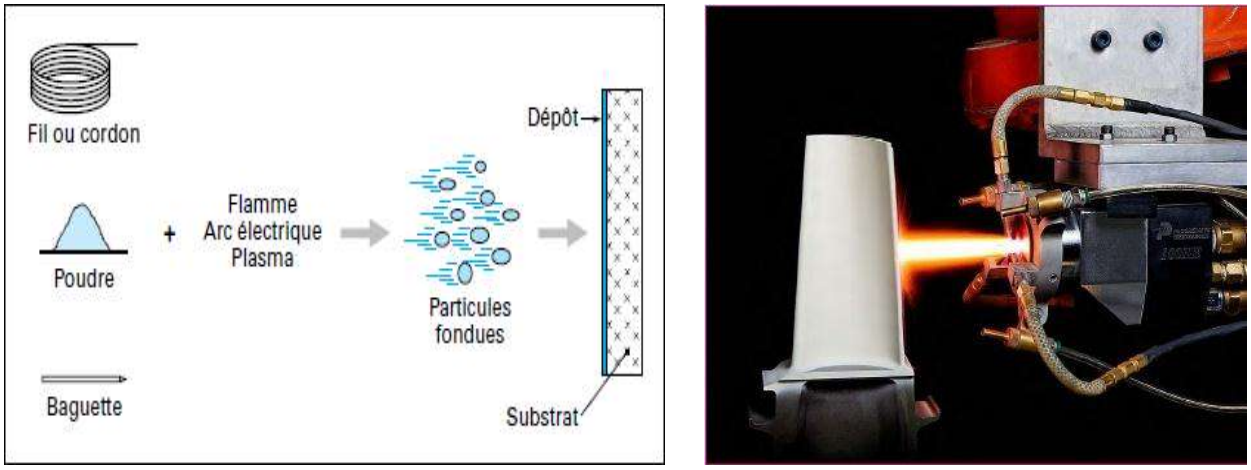


Figure I.1 : Principe fondamental de la projection thermique **[2]**.

❖ I.2. Techniques de projection thermique :

Les procédés de projection thermique conventionnels consistent à projeter, à l'aide d'un gaz vecteur, un matériau d'apport, métallique ou non métallique, sous forme de poudre, de fil ou de baguette totalement ou partiellement fondue à condition que sa température de fusion soit inférieure d'au moins 573 K de sa température d'ébullition ou de décomposition pour qu'il ne se vaporise pas ou ne se décompose pas avant d'atteindre le substrat. Lorsque les matériaux à projeter sont conditionnés sous forme de fil ou de tige, leur extrémité fondue est atomisée par un courant gazeux et projetée sous forme de gouttes fondues. Ces procédés peuvent être regroupés en deux familles selon la source de chaleur utilisée pour fondre le matériau : flamme ou arc électrique. **[3]**

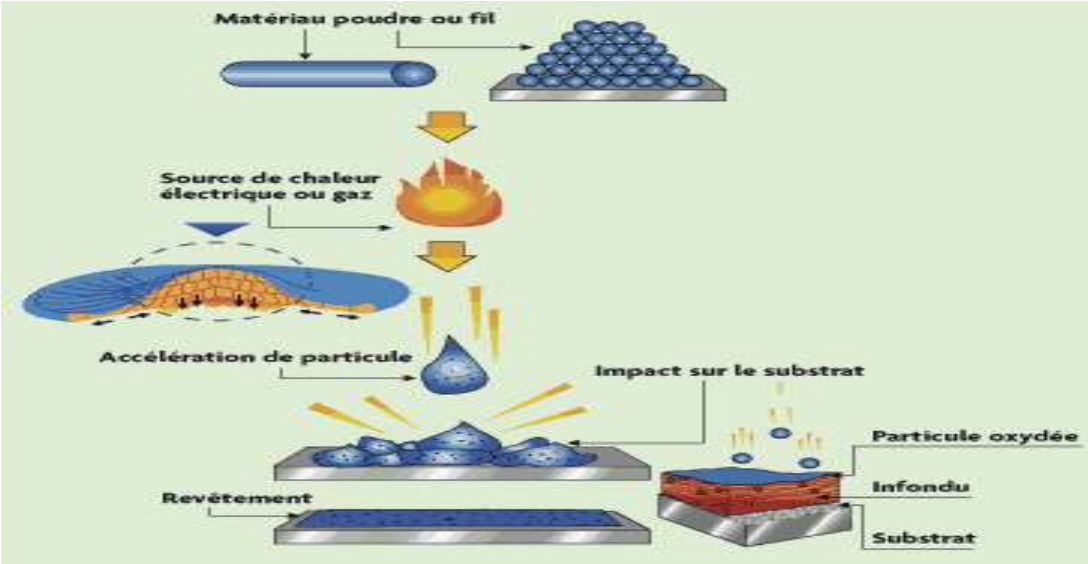


Figure I.2 Schéma Techniques de la projection thermique.**[4]**

❖ I.3.Les domaines d'application :

La projection thermique utilisée dans de nombreux secteurs:

- mécanique (rouleaux de laminoirs, guides fils, pompes, pistons…).
- aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique…).
- biomédical (prothèses, couches biocompatibles…).

❖ I.4.Présentation générale des procédés de projection thermique :

La projection thermique est une famille de procédés de formation d'un revêtement sur Des pièces industrielles.

Les matériaux à projeter son généralement sous forme de poudre .de fil ou de baguette et sont Soumis à une source de chaleur. les procédés de fabrication de revêtement sont variés et utilisent différentes source de chaleur :la projection flamme poudre, la projection flamme fil , l'arc électrique ,la projection plasma ,la projection par flamme supersonique (HVOF)et le canon à détonation.

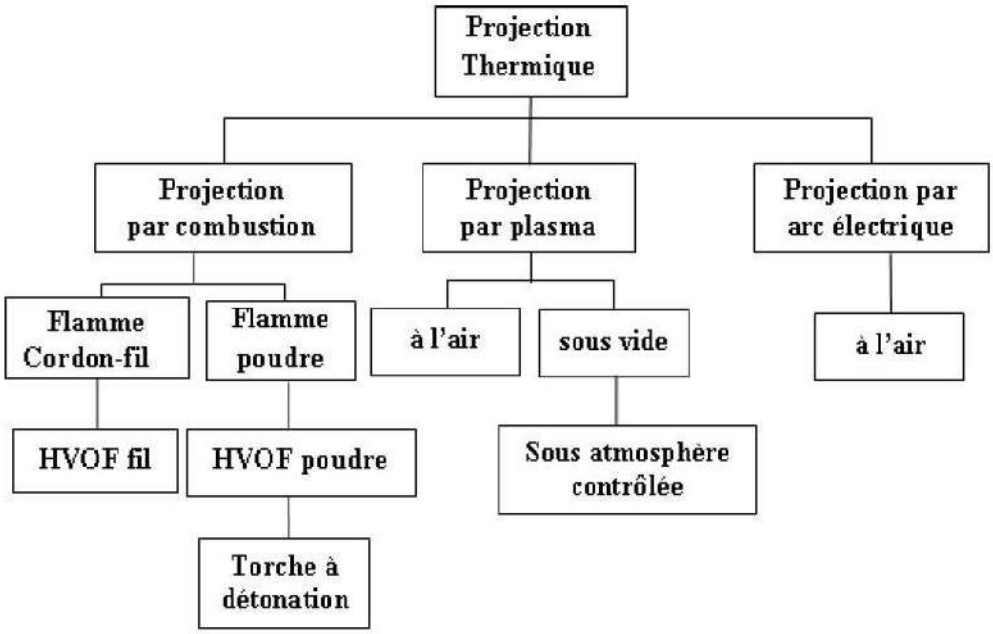


Figure I.3 : Les types de la projection thermique **[5].**

❖ I.5.Les types de projection thermique

➢ I.5.1.Laprojection à la flamme :

La projection à la flamme fait partie d'un groupe plus large de processus deRevêtement appelé projection thermique. De nombreux matériaux peuvent êtreDéposés en tant que revêtement à l'aide de ce processus.

Ce procédé permet de réaliser des dépôts de quelques dixièmes à plusieursMillimètres d'épaisseur avec un taux de porosité de 2 à 15%.

La vitesse des particules peut atteindre 100m/s, la résistance d'arrachement du revêtement jusqu'à 50 MPa. Procédé très utilisé pour l'anticorrosion.

Procédé de projection thermique dans lequel la chaleur nécessaire à la fusiondu produit d'apport est obtenue par la combustion d'un mélange d'oxygène à gaz Combustible considéré (flamme oxygaz), le produit d'apport fondu étant ensuiteprojeté sur la pièce par un fluide véhiculaire (air comprimé).

Le produit d'apport est sous forme de fil ou de poudre, Cette technologie peutêtre utilisée pour :

- La reconstruction / Réparation.
- La résistance à la corrosion.
- La résistance à l'usure.

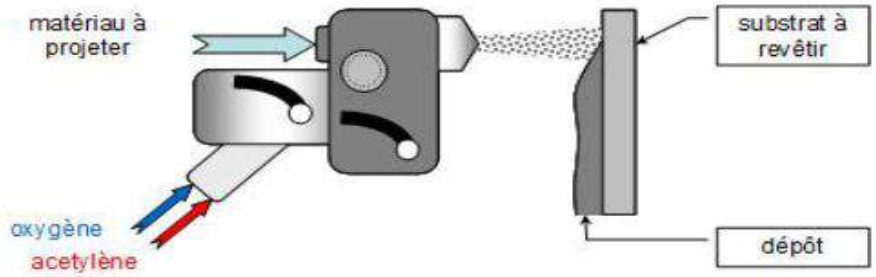


Figure I.4: Projection à la flamme **[6]**

➢ I.5.1.1.Projection flamme poudre :

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple detous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à traversl'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond est entraînée par les gaz oxygène carburant(généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce àrevêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ceprocédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvantapprocher 20%.

La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Un des principauxavantages des pistolets de projection flamme poudre par rapport au pistolet de projection flamme fil est lié à la plus grande variété de revêtements disponibles dueau 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 ontune température de fusion supérieure à celle de la flamme ou alors dans le cas où lematériau projeté se décompose à la chaleur.

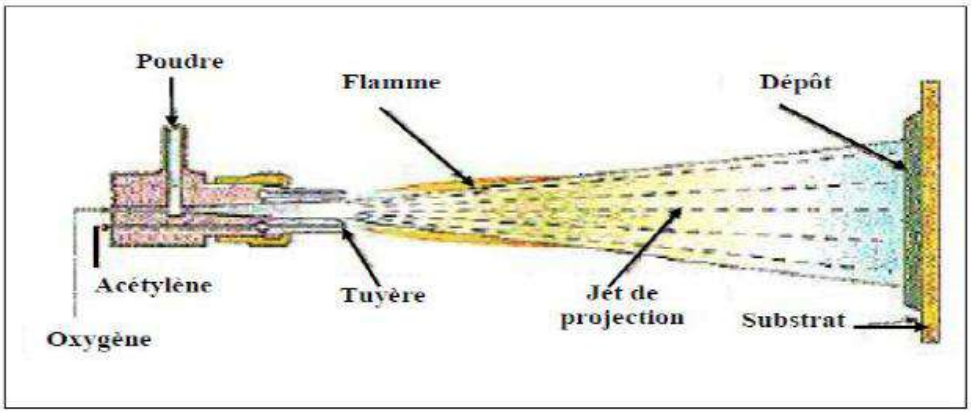


Figure I.6: Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre **[8].**

➢ I.5.1.2 .La projection flamme-fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme est uniquement utilisée pour tendre le matériau d'abord, introduit sous forme de fil, de barreau ou de cordon en son centre (figure I.7). La projection des gouttelettes sur le substrat est assurée par un jet de gaz comprimé qui atomise le matériau fondu. La vitesse des particules est plus élevée (environ 150m/s). Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme (F_{usion} = 0,95 F_{lamme}). Cette technique permet de projeter des métaux (Al, Cu, Ni), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al_2O_3, Al_2O_3-T_iO_2, Z_rO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

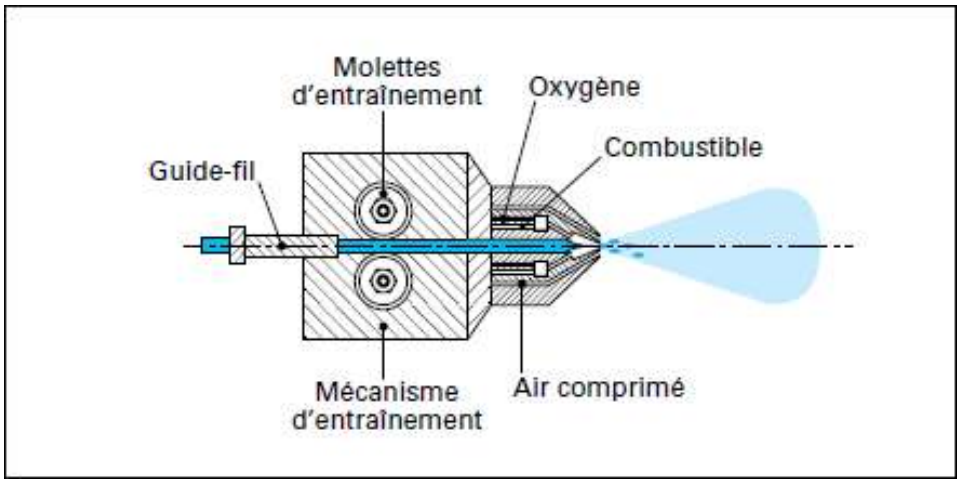


Figure I-7 : Le principe de la projection flamme fil **[9].**

➢ I.5.1.3 .La projection supersonique par combustion

La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 à 600 m.s-1) desParticules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre àPression élevée (0,5 à 1 MPa).

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

Le procédé HVAF : High Vélocité Air-fuel Flamme, la combustion est assuréePar un mélange kérosène-air comprimé **[10]**.

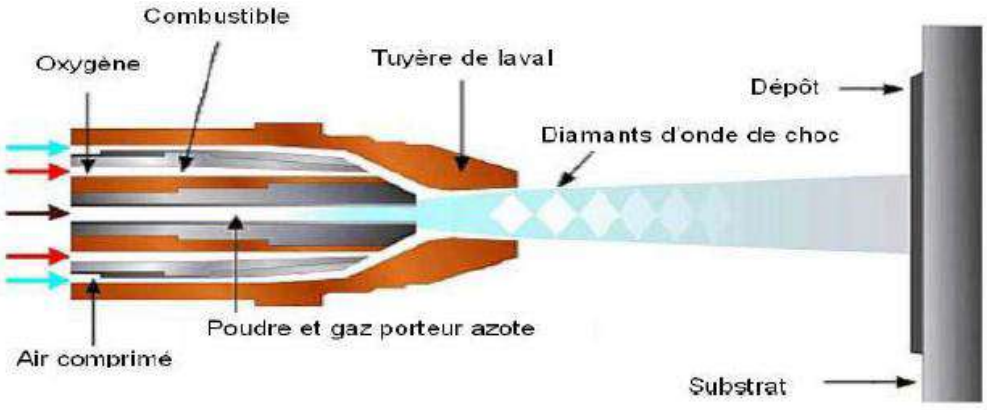


Figure I.8: schéma du procédé HVOF

➢ I.5.1.4.Canon à détonation :

Le principe de la projection par canon à détonation consiste à utiliser ladétonation ou les ondes de choc résultant de l'explosion contrôlée d'un mélange oxygène / carburant pour fondre et projeter la poudre des matériaux sélectionné sur lapièce à revêtir.

Le système est complexe. En opération un mélange de la poudre à projeter,d'acétylène et d'oxygène est injecté dans la chambre de détonation qui débouche surune tuyère d'un mètre de long et 2,5 cm de diamètre comme illustré sur le diagrammesuivant. Les gaz de combustion peuvent être neutre, oxydants ou réducteurs, leurtempérature peut être contrôlée soit par ajout de gaz neutre pour les refroidir ou soitpar ajout d'hydrogène pour les réchauffer. Un mélange poudre / gaz mesuré etcontrôlé automatiquement est injecté dans la chambre d'explosion avec un système desoupapes et allumé avec une bougie. L'onde de choc résultante accélère les particulesde poudre jusqu'à environ 750 m/s et produit des températures pouvant atteindre4000°C. La pression générée par la détonation ferme les soupapes de contrôle jusqu'àce que la pression dans la chambre soit uniforme. A la suite le cycle est répété entre 4et 8 fois par seconde. Entre chaque cycle la chambre est purgée à l'azote ou à l'aircomprimé. Chaque détonation dépose une couche très dense et très adhérente deplusieurs microns d'épaisseur et d'environ 2,5 cm de diamètre. La répétition des cyclesconduit à des revêtements épais **[11].**

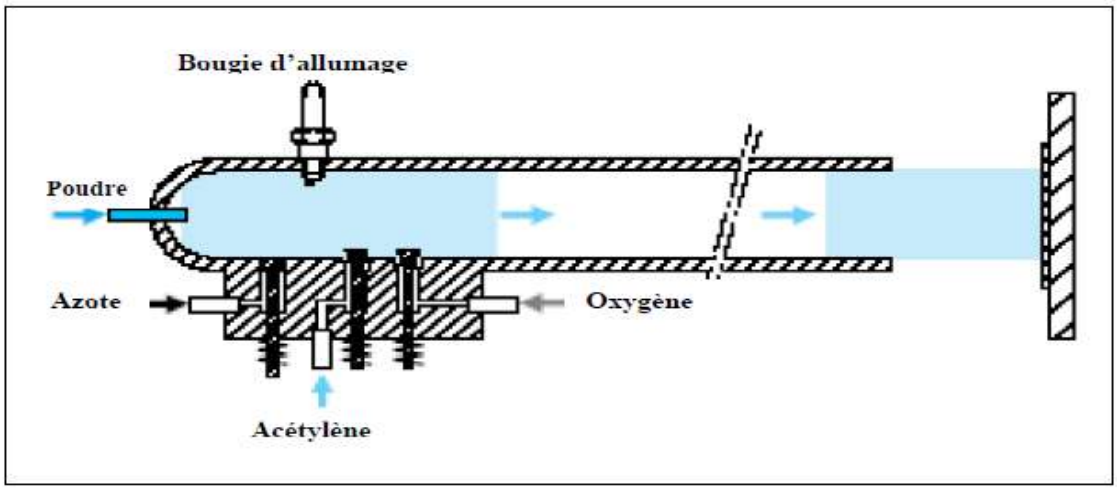


Figure I.9 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation

➢ I.5.2.Projection par arc électrique:

On peut distinguer deux procédés qui utilisent comme source d'énergie un arc électrique : la projection arc-fil et la projection par plasma d'arc.

➢ I.5.2.1 La projection arc-fil

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

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts épais de 0,5 à 3 mm avec une adhérence de 20 à 40MPa. Il permet de déposer des matériaux métalliques ductiles tels que le zinc, l'aluminium ou le cuivre mais également des superalliages non ductiles avec des qualités de

dépôt comparables à ceux obtenues par projection plasma, ainsi que des dépôts métalliques renforcés par des particules céramiques non fondues grâce à la technologie des fils fourrés.

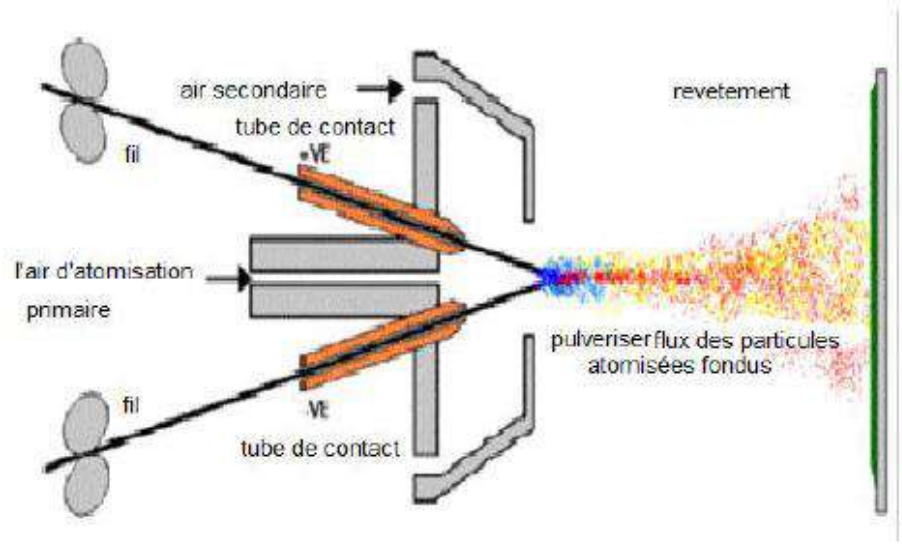


Figure I.10 : Principe de fonctionnement de l'arc fil **[12].**

➢ I.5.2.2La projection par plasma d'arc soufflé :

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

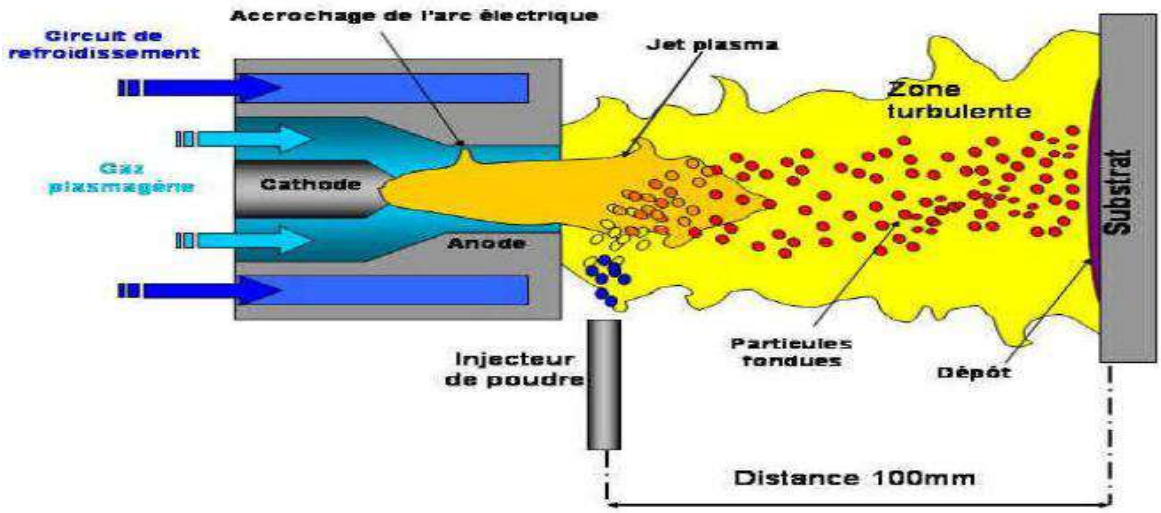


Figure I.12 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé**.**

➢ I.5.3.LaProjection 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]**

➢ I.5.3.1 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 onde concentrique qui constitue la tuyère .le gaz plasmagène circule dans l'espace entre ces deux éléments .Deux familles de torche sont à distinguer **[15].**

- **Torche à arc transféré :**

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

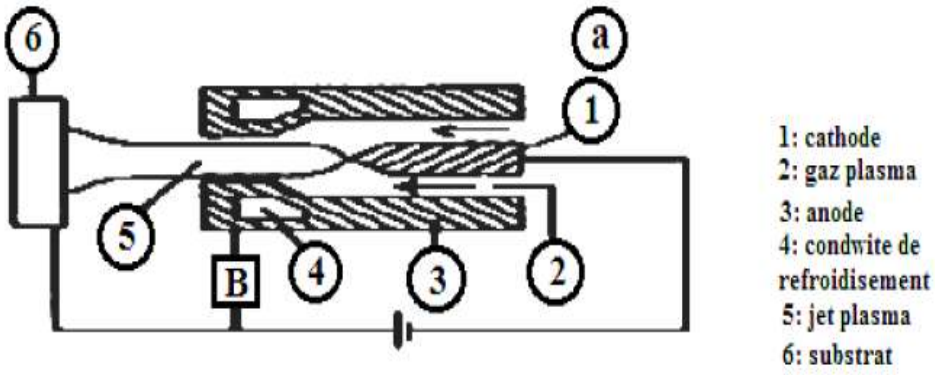


Figure I.13: Torche plasma à arc transféré

- **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.**[16].**

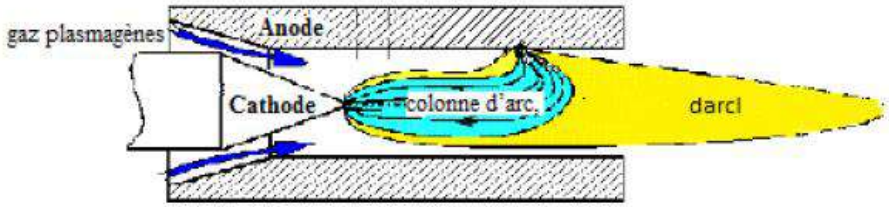


Figure I.14: Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma**.**

- **I.5.3.1.1. Amorçage de l'arc :**

L'amorçage de l'arc est assuré par une surtension, supérieure à une tension critique appelée tensionde claquage, appliquée entre les deux électrodes.

La valeur de cette tension de claquage dépend de la nature du gaz plasmagène, de la pression et la distance inter-électrode.

Cette surtension (6 à 10kV) est appliquée à l'aide d'un circuit haute fréquence (plusieurs MHz) en série ou en parallèle avecl'arc et le générateur de courant. L'argon est souvent utilisé à l'amorçage car il érode peu lesélectrodes et qu'il s'ionise à plus faible énergie que les autres gaz plasmagènes (N 2 , H 2 , He).**[17]**

➢ I.5.3.1.2 .Le gaz plasmagène :

Le gaz plasmagène est généralement constitué de deux gaz, le premier est un gaz lourd que donne sa quantité de mouvement aux particules injectées. Le choix est alors limité à l'argon (40 g/mole) ou à l'azote moléculaire (28 g/mole). Les torches utilisées (développée au laboratoire ou industrielle comme la PTF4 de Sulzer Metco) étant conçues pour travailler à l'argon comme gaz primaire nous ne considérerons que ce gaz. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent la tension « utile » qui va être disponible dans le jet de plasma est $\int_0^1 E(Z).dz$ où lest la longueur de la colonne d'arc. Le champ électrique dépend fortement des pertes de la colonne d'arc. Plus celles-ci augmentent plus l'arc se constricte pour les limiter, accroissant par ce biais le champ électrique E. Les pertes latérales dépendent principalement d'une part du diamètre interne de la tuyère (plus il diminue plus elles augmentent, pour un courant donné) et d'autre part de la conductivité thermique du gaz plasmagène. Cette dernière est de loin la plus faible de toutes avec argon. **[18]**

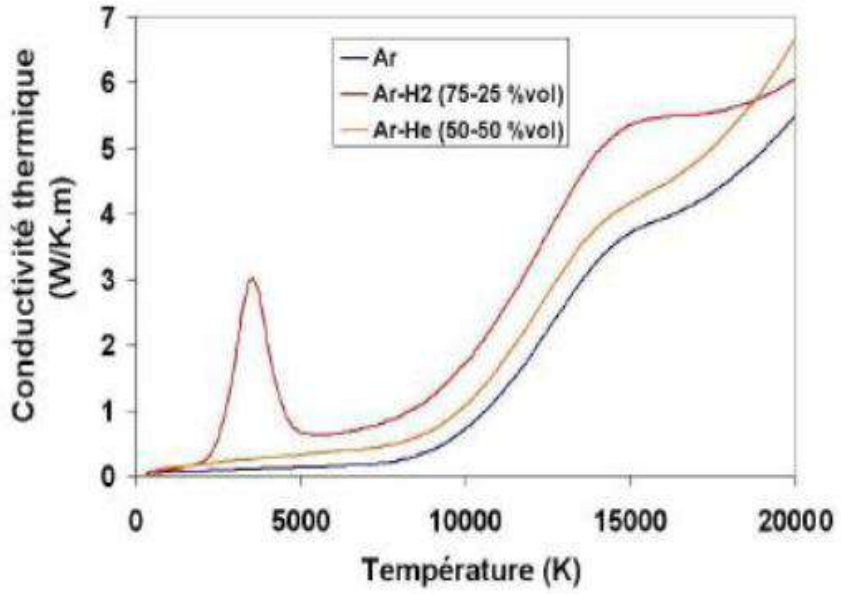


Figure I.15: Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes. **[19]**

Pour ce dernier, cela implique des champs dans la colonne d'arc de quelques centaines de V/m limitant ainsi la tension utile à 10-15 V pour une tuyère de 6 ou 7 mm de diamètre interne. C'est pourquoi on utilise des mélanges Ar-H2 ou Ar-He, chacun ayant des avantages et des inconvénients. La tension moyenne dans l'arc est alors, suivant les conditions de fonctionnement, d'une trentaine de volts pour Ar pur, une quarantaine de volts Pour Ar-He et une bonne soixantaine pour Ar-H2. Cependant dans ce dernier cas, le courant est limité à environ 600-650 A car la constriction au niveau pied cathodique par l'hydrogène entraîne l'usure plus rapide de la cathode au-delà de ce courant. Par contre avec l'Ar ou l'Ar-He on peut atteindre 900 A voire 1000 A. De plus l'He accroît la viscosité du mélange au-delà de 10000 K (cf. FigureI.16) 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.

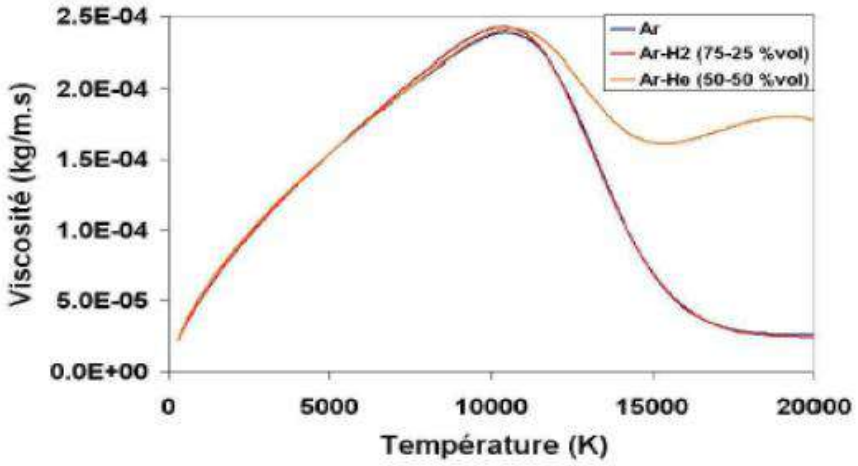


Figure I.16: Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. **[19]**

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

Comme nous pouvons le voir sur la **Figure I.17**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.

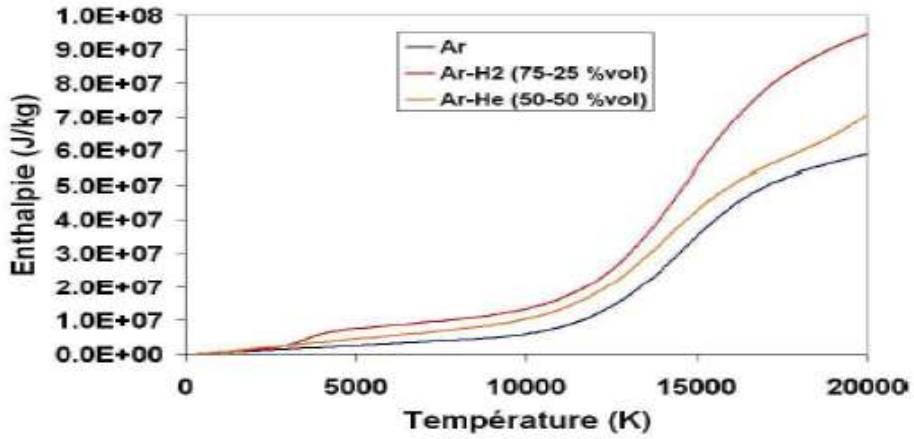


Figure I.17: Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. **[19]**

➢ I.5.3.1.3. 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 peutêtre.

- **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.

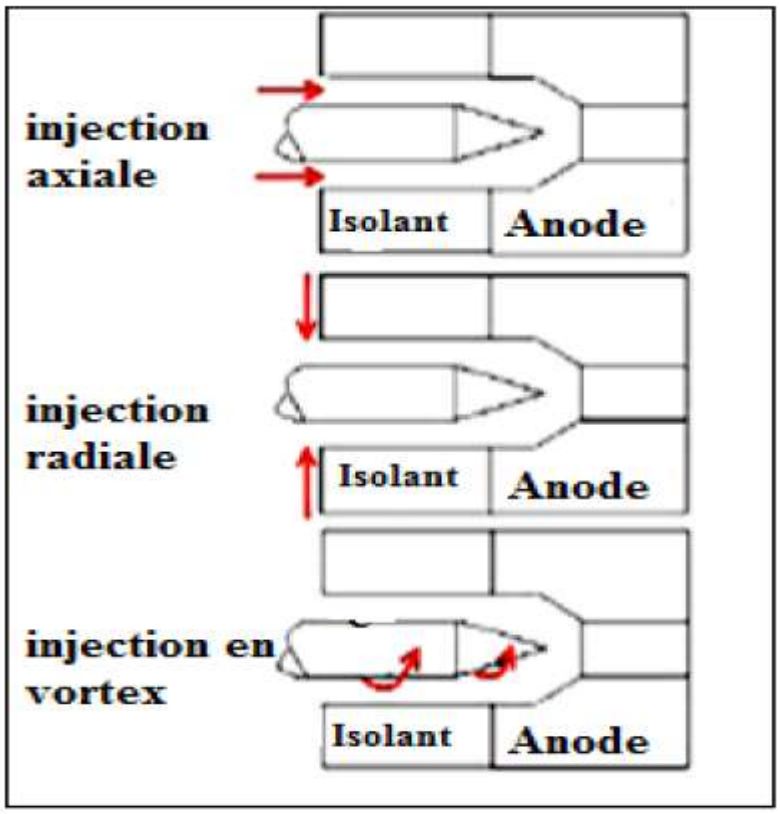


Figure I.18: schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma

➢ I.5.3.2. Formation du jet plasma :

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

Une couche limite chaude de température supérieure à 6000 K se développe autour de la colonne d'arc tandis qu'une partie du gaz plasmagène, s'écoule le long de l'anode. Une couche limite froide (Figure I-19), gaine la colonne d'arc et assure sa stabilité.

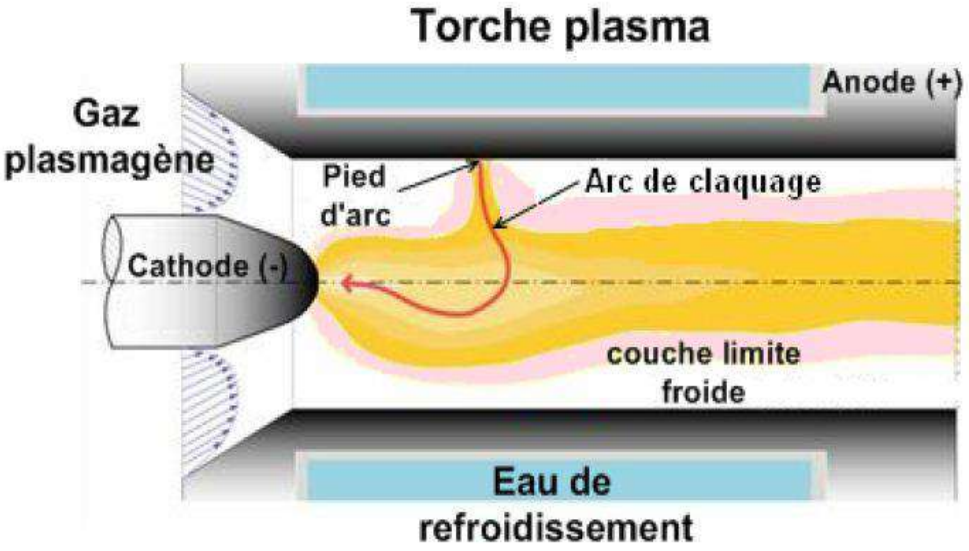


Figure I.19.Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche Plasma à courant continu. **[20]**

La boucle de plasma de connexion à l'anode, caractérisée par une températureSupérieure à la température d'ionisation (T > 8000 K) et sa faible densité massique (environ 1/30 de celle du gaz froid), est soumise à des forces dynamiques liées à l'écoulement gazeux et aux forces électromagnétiques de Laplace (souvent dites de Lorentz) dues à l'interaction entre le courant d'arc et son champ magnétique.

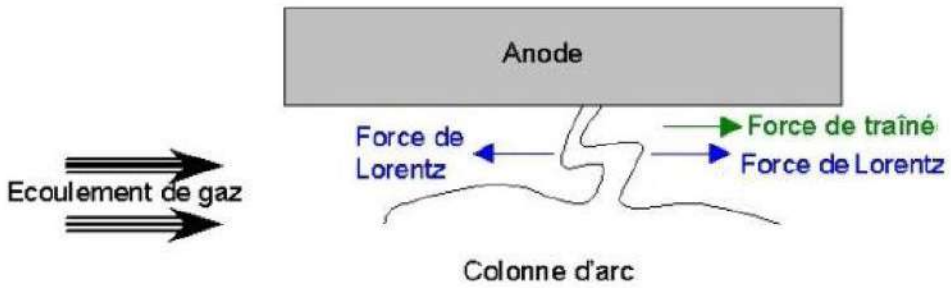


Figure I.20. Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc

- **I.5.3.3.** Ecoulement du jet plasma **:**

La Figure I-21 schématise l'écoulement du jet plasma dans l'atmosphère. Le jet formé dans la chambre d'arc (zone 1) sort avec une grande vitesse (500 à 2500 m.s-1) et entre en contact

avec le gaz environnant froid et au repos (zone 2). La différence de vitesse entre le jet et les gaz froids environnants engendre, à la frontière du jet, la formation de tourbillons d'instabilités, appelés "tourbillons de Kelvin-Helmotz". 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^{-3} s et 10^{-4} s, 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^{-1}s 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 **[21]**

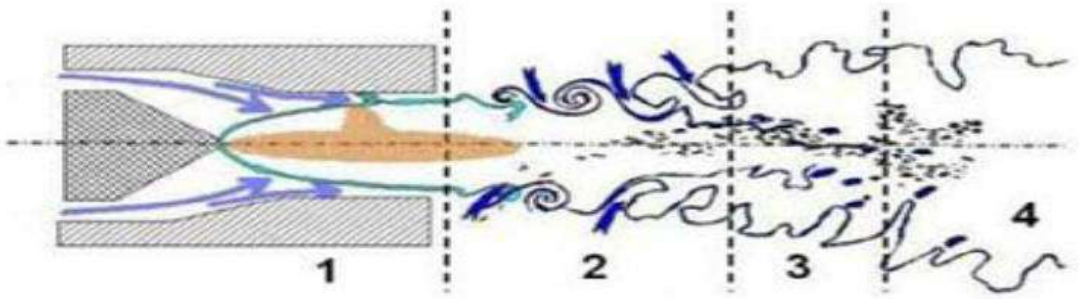


Figure I.21. Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé**.**

➢ I.5.4.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, …).**[22]**

➢ I.5.4.1 .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 lecœur 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) :

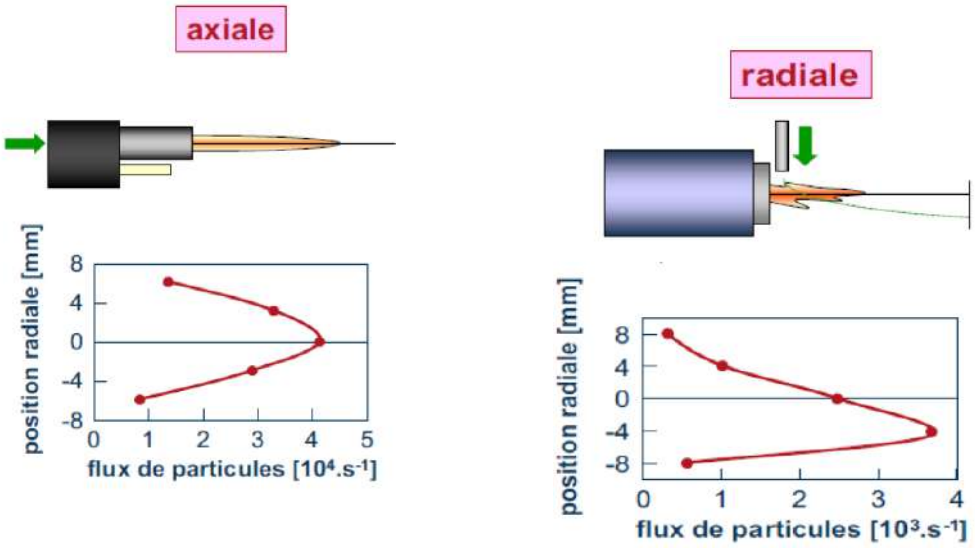


Figure I.22: schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)

❖ I.6. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat

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

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

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

La lamelle est la brique élémentaire constituant la couche. Sa morphologie et sesPropriétés conditionnent la microstructure du dépôt et ses propriétés. L'analysedes phénomènes à l'impact permet de corréler les paramètres de projection à la microstructure durevêtement **[23]**.

➢ I.6.1.Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat

Lors de son impact, la particule peut rebondir ou s'étaler avec ou sans éjection dematière. En effet, au contact avec le substrat, la particule se retrouve brusquement décélérée.L'augmentation de pression à l'interface entraîne la propagation d'une onde de pression à L'intérieur du matériau liquide qui peut provoquer son éjection partielle. Mundo et al. (1995)**[24]**ont déterminé un critère K, dit critère de Sommerfeld, reliant le comportement de laparticule à l'impact aux nombres de Reynolds et de Weber. Ce critère est défini parl'équation (I.1)

$$\boldsymbol{K = W_e^{0.5} . R_e^{0.5}} \quad \text{(I.1)}$$

Ou :

W_e Est le nombre de Waber (équation I-2)

R_e Est le nombre de Reynolds (équation I-3)

$$\mathbf{W_e} = \frac{\boldsymbol{\rho . d \vartheta^2}}{\boldsymbol{\sigma}} . \quad \text{(I.2)}$$

$$\mathbf{R_e} = \frac{\boldsymbol{\rho . d \vartheta}}{\boldsymbol{\mu}} \quad \text{(I.3)}$$

Ou :

ρ: est la masse volumique de la particule (kg.m-3)

d : son diamètre(m)

V : sa vitesse (ms-)

σ:la tension de surface liquide – vapeur du matériau (J.m-3)

μ: sa viscosité (kg . m. s – 2)

Si K est inférieur à 3 il y a rebond de la particule, si K est compris entre 3et 57,7 il y aétalement sans éjection de matière et pour K supérieur à 57,7 il y a « splashing »

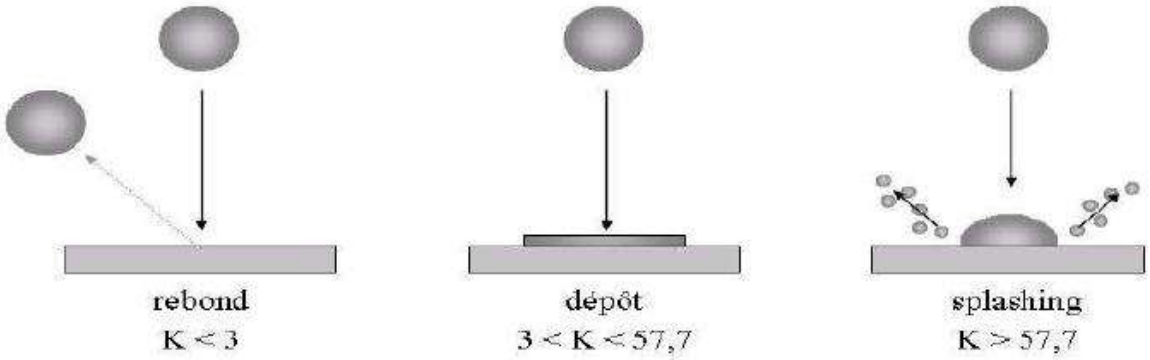


Figure I.23: Modes d'impact **[25].**

Les éclaboussures présentes dans le troisième mode apparaissent quelques dizaines denanosecondesapres l'impact et sont dues a la propagation de l'onde de pression **[26]**

➢ I.6.2.Etalement de la particule

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grace à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule.
L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de Surface à la fin de l'écrasement**[27, 28].**

- **L'impact :**

A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse,il a été observe pour des particules d'alumine que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) se passe toujours si leur nombre de Sommerfeld *K* est supérieur à 70 et parfois quand 10<*K*<70 **[29].** Cet éclaboussement croît en fonction de *K* et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3mm,

C’est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gazplasmagène.

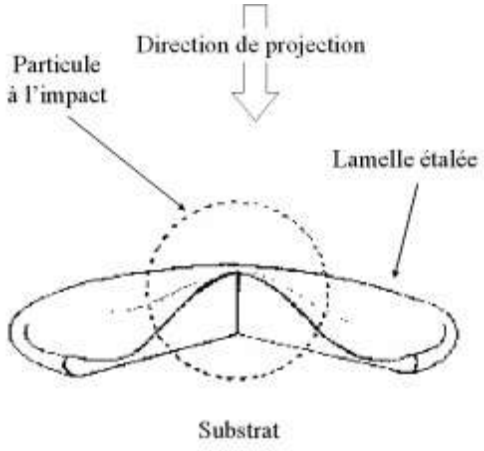


Figure I.24: Schéma d’écrasement de la particule **[6]**.

- **l’étalement :**

L’étalement des particules est un phénomènecomplexe notamment quand la solidification de lamelles commence avant l’étalement complet. Les phénomènes intervenant dans cette étape sont gouvernés par plusieurs facteurs qui peuvent être classes en deux groupes : les propriétés des particules a l’impact (le diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l’état physico-chimique etc.…) et l’état de laSurface du substrat où les particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques, etc.…) **[30].**

Plusieurs études expérimentales ont été effectuées (97% sur les surfaces lisses) pourComprendre l’influence des propriétés des particules a l’impact sur leur écrasement et laFormation des spalts **[31]**. D’autres travaux ont étéréalisés pour examiner les effets de laTempérature**[32]**, de la rugosité **[33]**et des propriétés thermiques du substrat **[34]** surL’étalement et la solidification des particules. L’effet de la mouillabilité de la particule sur leSubstrat a été aussi évalué **[35].** Il faut noter que la mouillabilité dépend de la rugosité et de laPorosité du substrat ainsi que de la composition chimique et de l’état cristallin des particuleset du substrat. Madjeski (1976)**[36]** a défini le dégréé d’étalementsξ comme le rapport entre le diamètre de la particule étalée D et le diamètre d de la particule avant l’impact (équation I-4)

$$\varepsilon = \frac{D}{d}$$ ……..(I-4)

A partir de l'équation (I-4) et en négligeant les phénomènes de tension de surface, ce rapportpeut être relie aux propriétés de la particule liquide a l'impact par l'intermédiaire du nombre de Reynolds suivant l'équations (I.5) :

$$\varepsilon = 1,29.R_e^{0.2}$$ …… (I-5)

Des études numériques de la simulation d'impact de gouttes sur un substrat et des étudesexpérimentales ont conduit également à une équation du même type (I-6) **[37].**

$$\varepsilon = A.R_e^b$$ …… (I-6)

Où :

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

➢ I.6.3.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 despropriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamellesubstratvarie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et larugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène **[38]**

❖ I.7. Caractéristiques microstructurales des revêtements :

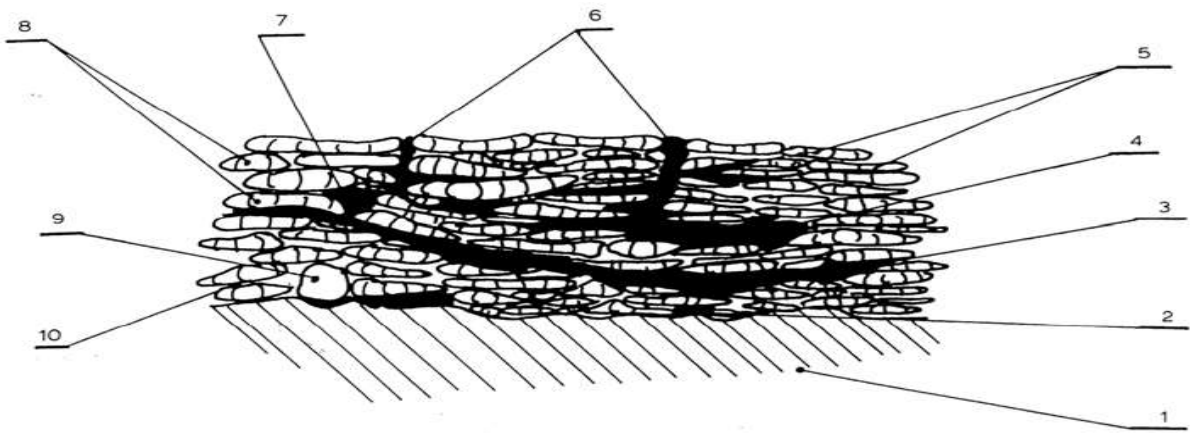
Les revêtements élaborés par projection thermique sont constitués d'un empilement successif de lamelles plus ou moins fondues. A chaque passage de la pièce à revêtir devant le jet plasma, des particules sont déposées. Comme la distribution de ces dernières au sein de l'écoulement est gaussienne, le cordon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

Ce mouvement inclut généralement un décalage de la torche, entre chaque passage de la pièce devant la torche il définit le « pas de projection» qui conditionne le recouvrement des cordons. Il est nécessaire de contrôler ce recouvrement afin de contrôler le flux thermique apporté à la couche sous- jacente. *Bernard etal. (1990)* ont préconisé pour la projection de

matériaux céramiques un taux de recouvrement de 50% et une épaisseur par passe maximale de 10 μm **[39]**.

Le revêtement présente une structure lamellaire anisotrope et hétérogène résultant de la disparité de l'état thermocinétique des particules à l'impact, de leurs modes d'étalement et de solidification. Des contraintes au sein de la couche provoquent également l'apparition de fissures (figure I.18). Cette structure présente des pores qui jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques et thermiques de la couche. Ces pores peuvent être classifiés en trois catégories **[40**, **41**, **42]** .

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



1 : substrat ; 2 : défauts d'adhérence ; 3 : décohésion du dépôt due aux passes de latorche ; 4 : décohésion du dépôt due à la relaxation des contraintes résiduelles ; 5 : fissuresau sein de lamelles ; 6 : fissures verticales résultant des contraintes résiduelles et porositéouvert ; 7 : porosité fermée ; 8 : particules complètement fondues ; 9 : particulesinfondés ; 10 : mauvais contacts entre lamelles

Figure I .26 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma **[41]**.

➢ I.7.1. Dépôts d'alumine :

Les figures I.27 a et b présentent, respectivement, les micrographies en coupe polie et aprèsFracturedes dépôts d'alumine élabores a 573 K.

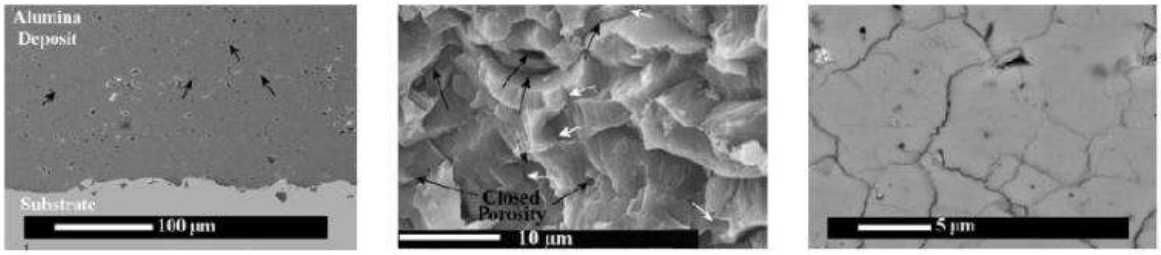


Figure I.27: Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c)Du dépôt d'alumine élabore a 573 K **[30]**.

Les défauts inter-lamellaires (flèches noires sur la figure I.27-a) et de la porosité peuvent êtreobservés sur ces images. La figure I.27-b montre la structure lamellaire du dépôt d'alumine etLamicrostructurecrostructure colonnaire des splats ainsi que les défauts intra-lamellaires (flèchesblanches). Les micrographies de la surface polie du dépôt d'alumine (figure I.27-c) mettent enévidence la présence de porosité ainsi que des microfissures. Ces microfissures, liées auxcontraintes de trempe, indiquent des contacts de bonne qualité entre les splats. Une structureSimilaire a été observée pour des dépôts d'alumine réalises a 200et 573K **[30]**.

❖ I.8. Substrat

Dans le cas de la projection thermique, l'état physico-chimique de la surfacedu substrat joue un rôle très important sur la structure des lamelles, la formation du dépôt et, par conséquent, son adhérence. Cette propriété est un critère de qualité important, car il est en effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas à son substrat **[43 ,44].**

➢ I.8.1.Préparation de substrat :

Les techniques de préparation de surface doivent permettre de nettoyer les matériaux et de modifier l'état géométrique de leur surface. La réalisation d'un dépôt par projection thermique impose de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi **[45,46]** un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passivant et des graisses. C'est la première étape de préparation des pièces destinées à être revêtues. Eneffet, elle a pour conséquence la destruction et l'élimination de la plupart desimpuretés (graisses, inclusions superficielles, etc.) généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements ; un

traitement mécanique appelé ≪ sablage ≫ ou Pro jetage qui permet la création d'un état de surface rugueux. Apres le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux devenir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

❖ I.9.L'état de l'art :

Mostaghimi et al.**[47]** ont montré que le rapport d'aplatissement est lié au nombre de Reynolds et, au nombre de Weber. Cependant, l'effet de la solidification sur la propagation de gouttelette peut être négligé quand le rapport du nombre de Stefan au nombre de Prandtl est beaucoup plus petit que l'unité.

Zhao et autres **[48]** et Pasandideh-Fard et autres **[49]** ont proposé des modèles détaillés en résolvant l'équation de Navier-Stokes couplée à l'équation d'énergie. Leurs prévisions théoriques de la propagation de gouttelette étaient en bon accordavec les données expérimentales. Cependant, les procédures numériques adoptées dans ces modèles étaient informatique chères. De tels modèles détaillés sont plus utiles pour obtenir une compréhension fondamentale profonde sur les processus physiques impliqués dans le phénomène d'impact.

Zhang a proposé un modèle théorique basé sur le volume de fluide (VOF) pour la propagation de gouttelette et la solidification considérant la tension superficielle, lasolidification et la résistance thermique de contact. Le rapport splat-flattening a été décrit en fonction des nombres de Reynolds, de Weber, de Prandtl et de Jakob. Zhang et autres **[50]** ont étudié la morphologie de l'impact et la re-solidification de substrat numériquement et expérimentalement et ont constaté que la taille, la vitesse, et la température, de gouttelette d'un part et le matériau de substrat et leur température jouent les rôles significatifs dans la morphologie de l'impact et le taux de solidification.

Dans le même axe de recherche nous proposant dans cette étude la réalisation des expériences numériquesde l'impact simultané de deux goutte d'alumine sur un substrat en acier dans l'objectif de mieux comprendre l'interaction entre particule lors de la formation de lamelle.

CHAPITRE 2

❖ Introduction :

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

Pour résoudre un problème de la simulation numérique d'impact d'une goutte sur un substrat fait appel à la résolution des équations mathématique (thermique et dynamique).

❖ II.1. écoulements bi phasiques :

Les écoulements bi phasiques peuvent être classés selon les phases enprésence (liquide, solide, ou gaz) ou selon la distribution spatiale des interfaces.
Pour le premier cas, les combinaisons possibles sont les suivantes :

- mélange de deux liquides non miscibles (échangeurs à contact direct).
- mélange gaz-solide (transport pneumatique du blé, fumées, poussières).
- mélange solide -liquide (transport de boue).
- mélange gaz-liquide (extraction pétrolière

Concernant le second cas, on distingue les écoulements suivants :

- à phase dispersées.
- à phase séparées.
- de transition.

➢ II.1.1.Modélisation bi phasique liquide/solide : [51]

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

$\propto_{\boldsymbol{i}}(X,\ t) = \begin{cases} \mathbf{1}\boldsymbol{siX} \in \boldsymbol{\Omega_i} \\ \mathbf{0}\boldsymbol{siX} \in \boldsymbol{\Omega}/\boldsymbol{\Omega_i} \end{cases}$; i∈ $\{\boldsymbol{l}, \boldsymbol{s}\}$

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

Dans le cadre général d'un problème faisant intervenir deux phases, un liquide et un solide, notre objectif est de parvenir à un modèle unique capable de traiter les trois configurations types illustrées figure II.1.

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

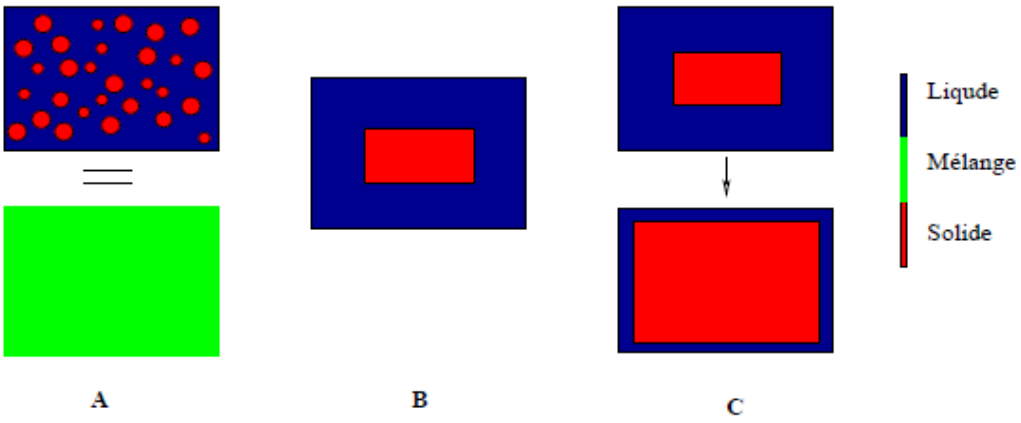


Figure II.1Répartition des phases pour trois problèmes bi phasiques types : A Mélange homogène ; BRépartition statique des phases ; C Problème dynamique de type changement de phase

❖ II.2 .model 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 **[52]**.

➢ II.2.1. Modélisation de l'écoulement des fluides :

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

- II.2.1.1. L’équation de la continuité

Cette équation concerne le principe de conservation de la masse dans un élément. Elle exprime l’égalité de la variation de la masse d’élément et de la différence entre la quantité de fluide qui entre et celle qui quitte pendant le même temps.**[52]**

L’équation de continuité globale est donnée par :

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

Dans un système de coordonnées cartésiennes, la vitesse$\vec{\mathbf{V}}$= (u, v, w) et **ρ** c’est la densitéDonc l’équation devient :

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

- II.2.1.2. L’équation de quantité de mouvement

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

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

Où :

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

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

P :la pression.

$\vec{\boldsymbol{g}}$:la gravité.**[52]**

- II.2.1.3. Équation de l’énergie

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}.\nabla T\right) = k\nabla^2 T + q \quad \text{(II.4)}$$

$$\Gamma = \frac{k}{\rho c}$$

T : température.

q : source volumique.**[52]**

❖ II.3. Modèle thermique

Les modèles de transfert thermique unidimensionnel couplés aux modèles qui décrivent l'étalement de la matière sur le substrat traite le refroidissement et la solidification des lamelles comme un problème uniquement thermique. Ce sont des modèles simples comparés aux modèles de l'écoulement de la phase fluide comme ceux développés par Mostaghimi et Al qui traite la formation des lamelles de façon très élargie pour prédire leur morphologie, ainsi que l'effet des différents paramètres sur cette dernière . **[53]**

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) **[54].** C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré comme une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan **[55].** 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 méthodesà grille mobile ou déformable : aussi appelées méthodes de suivi de front (front tracking).
- Les méthodes à grille spatiale fixe : qui regroupent par exemple la méthode de la chaleur spécifique équivalente, la méthode de la source de chaleur fictive et la méthode d'enthalpie.

➢ II.3.1.1. Méthode à grille mobile

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante **[56]** :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

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

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

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

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

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

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

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

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif, le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier **[56]**.

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

- **II.3.1.2. Méthode à grille fixe**

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

- **II.3.1.2.a. Méthode d'enthalpie**

La méthode d'enthalpie à maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide. Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et

al**[57].** Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'à aujourd'hui **[58].**

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

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

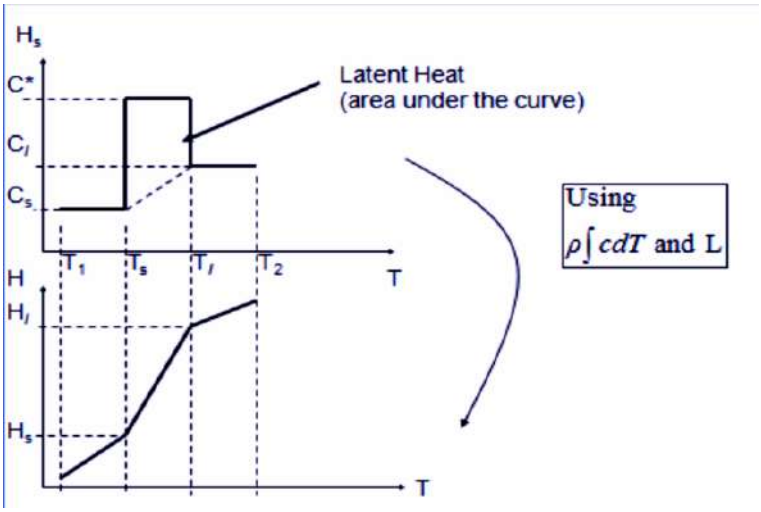


Figure II.2 :Évolution de l'enthalpie en fonction de la température

La conservation de l'énergies'exprime alors.

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

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

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

Et en fonction de la température

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

- **II.3.1.2.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente**

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique c_p**[59]**. Ainsi, si le chemin de

Solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente :

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

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

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

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

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

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

➢ II.3.2. Modèle thermique utilisé

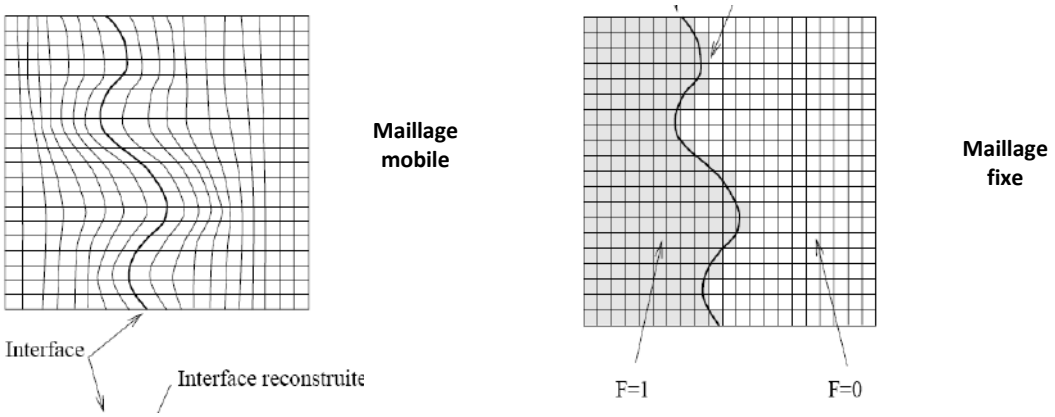
Le modèle de transferts thermiques que nous avons adopté est basé sur une formulation à chaleur spécifique équivalente, d'un fluide en mouvement qui va permettre donc de contrôler les conversions d'énergie dans le système.Le modèle de transferts thermiques à chaleur spécifique équivalente convient particulièrement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

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

❖ II.4.Calcul d'interfaces :

Les techniques de calcul d'interfaces peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles (figure II.3) en

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



a) Méthode lagrangienne

b) Méthode Eulérienne

Figure II.3 :Présentation des méthodes de calcul d'interface [60].

- **II.4.1La méthode lagrangienne** :

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

- **II.4.2 .La méthode eulérienne** :

Elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides .l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce

type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première **[61]** ; cependant de part sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation couleur.

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

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

➢ II.4.2.1. Les méthodes de suivi de front :

Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface
b) Fonction de hauteur
c) Méthode de ligne de niveau (level set)

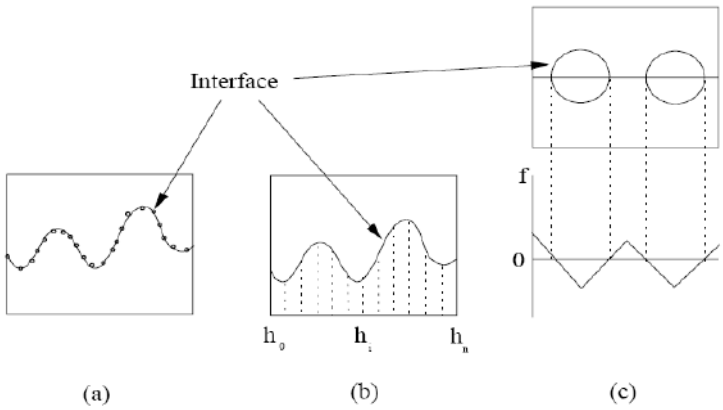


Figure II.4: Différentes méthodes de suivi de front

a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau,**[62].**

➢ **II.4.2.2. Les méthodes de suivi de volume :**

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

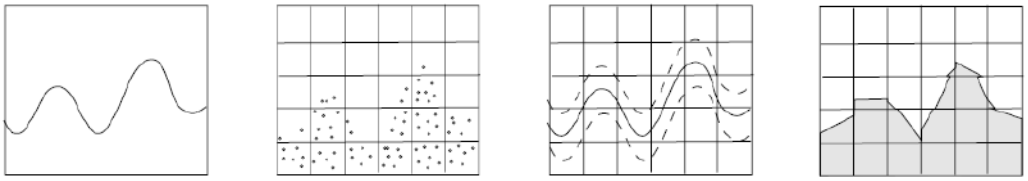


Figure II.5:Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [63,64].

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

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

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

Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [65]

➢ II.4.3. La Méthode VOF

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

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

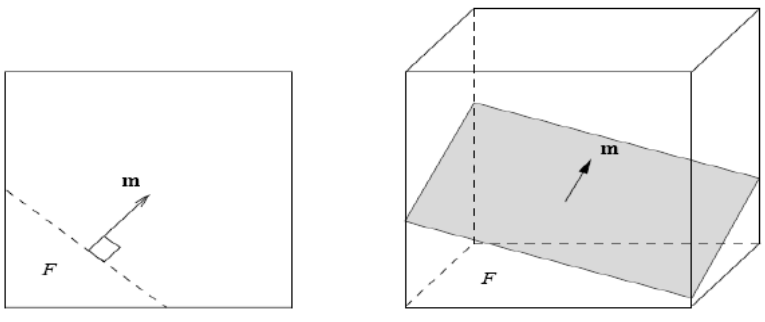


Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique [66].

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

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

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

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

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc.

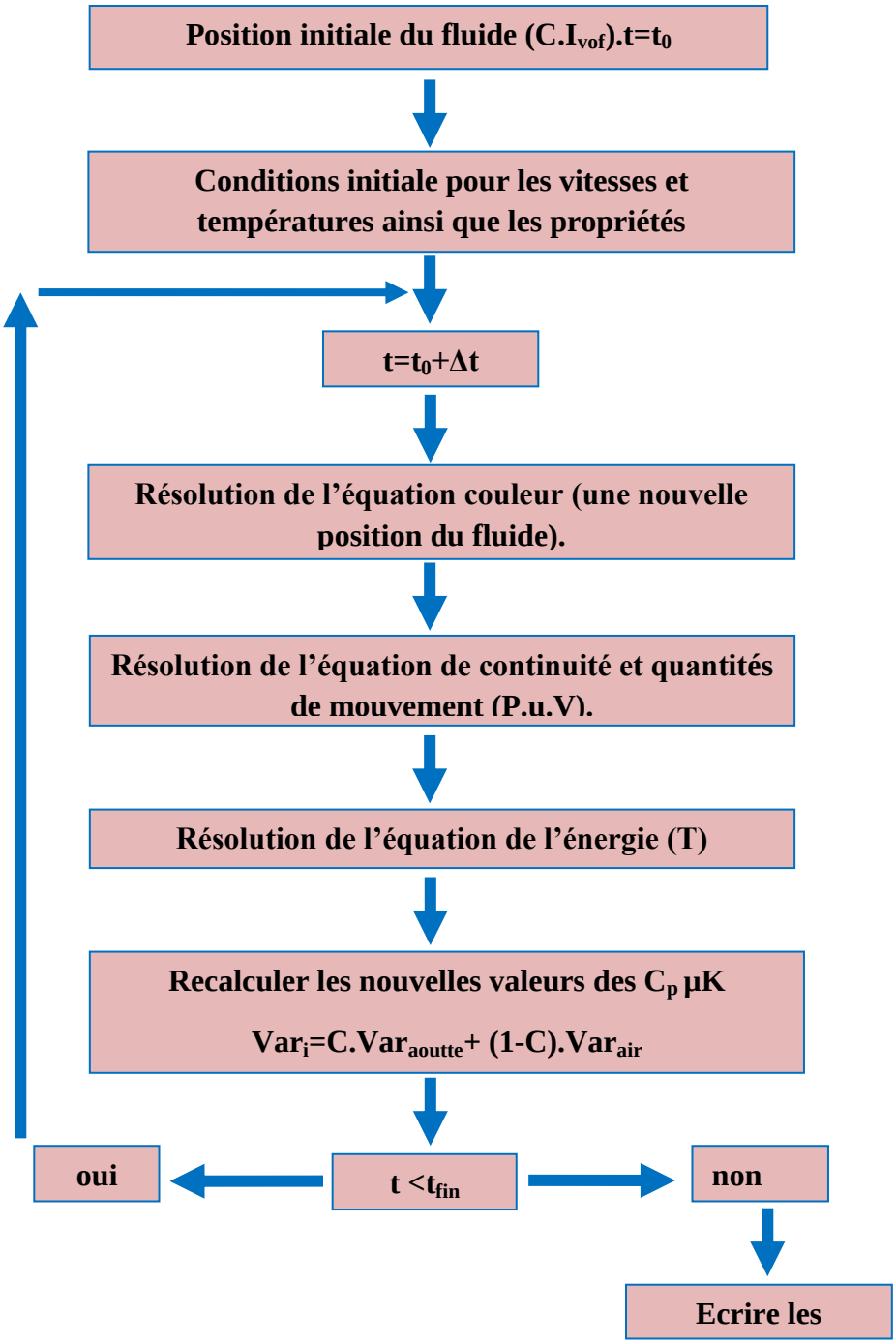

Position initiale du fluide (C.I$_{vof}$).t=t$_0$
Conditions initiale pour les vitesses et températures ainsi que les propriétés
t=t$_0$+Δt
Résolution de l'équation couleur (une nouvelle position du fluide).
Résolution de l'équation de continuité et quantités de mouvement (P.u.V).
Résolution de l'équation de l'énergie (T)
Recalculer les nouvelles valeurs des C$_p$ µK
Var$_i$=C.Var$_{aoutte}$+ (1-C).Var$_{air}$
t <t$_{fin}$
oui
non
Ecrire les

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

➢ 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 (VOF) que nous utilisons pour simuler le transport de l'interface, et les modèles de contrôle de la solidification.

CHAPITRE 3

❖ 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, méthode des éléments frontières) 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.1.1 Les trois grandes familles de méthodes

Il y'a trois méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des Systèmes d'équations aux drivées partielles régissant les écoulements. Ces méthodes sont

- Méthode des différences finies.
- Méthode des volumes finis.
- Méthode des éléments finis. **[67]**

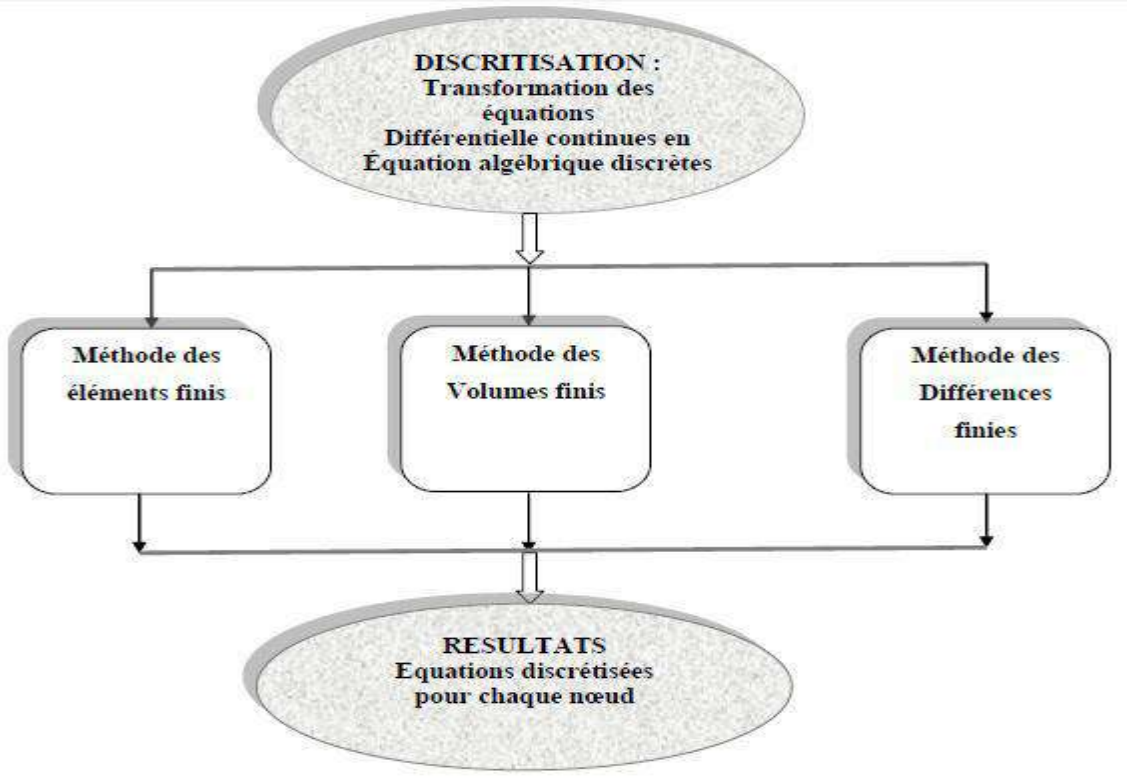


Figure III.1 : méthode de discrétisations **[68].**

➢ III.1.1.1 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets on noeuds du maillage. .

Avantage :

- grande simplicité d'écriture.
- faible coût de calcul

Inconvénients :

- Limitation de la géométrie des domaines de calculs.
- difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.
- en général absence de résultats de majoration d'erreurs **[69].**

➢ III.1.1.2. Méthode des volumes finis :

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de Volume de contrôle juxtaposé. Chacun de ces derniers englobe un "nœud principal". La méthode des volumes finis intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de la quantité de mouvement, équation de conservation de l'énergie. Sa mise en oeuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des Parallélépipèdes rectangles en dimension 3) **[69]**.

Avantage :

- Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de Contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage.
- Mise en oeuvre relativement facile ;
- Applicable aux géométries complexes ;
- Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande)

Inconvénients :

- Moins précis que les méthodes spectrales.
- on dispose de peu de résultats théoriques de convergence **[69]**.

➢ III.1.1.3.Méthode des éléments finis :

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

Avantage :

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

Inconvénients :

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

➢ III.1.1.3.1 .Démarche éléments finis :

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

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;

- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations **[70]**

➢ III.1.1.3.2. 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.

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

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. Résolution des équations par éléments finis

➢ III.2.1IntroductionMéthodes des éléments finis

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

a) la méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite `a partir d'un nombre finis de réels

b) la méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations. Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en n'importe quel point de l'elément par interpolation.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_h^k$, est de la forme **[71]**:

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

Où :

$\emptyset_i$ **:**désigne la valeur de la fonction approchée$\emptyset_h$au point $x_i$de coordonnées (x_i, y_i),

N_i :la fonction d'interpolation associée à x_i,

N_k :le nombre de fonctions utilisées pour l'élément K.

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

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

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

➢ III.2.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

➢ III. 2.2.1Formulation variationnelle forte

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s''ecrit alors comme suit : Trouver u(x) $u(x) \in$ espace des solutions U_S tel que **[72-73]** :

$:\mathcal{L}(u) - \mathcal{F} = 0 \ \forall x \in \Omega \ B(u) = u_0 \ \forall x \ \in \Gamma_{u0}$ ..... (III.2)

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

➢ III.2.2.2. Formulation variation elle faible:

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

1. approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par $\tilde{u}$tel que **[74]** :

$$\tilde{\mathbf{u}} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i}\tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.3)}$$

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

2. introduire (III. 3) dans (III.2) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon = \mathcal{L}(\tilde{u}) - \mathcal{F} \neq 0} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.4)}$$

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

$$\int_{\Omega} \mathbf{W_k}(\mathcal{L}(\tilde{\mathbf{u}}) - \mathcal{F})\mathbf{d\Omega} = \mathbf{0}, \mathbf{k} = \mathbf{1}, \mathbf{2}, \ldots \mathbf{N} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.5)}$$

Où N Nombre d'inconnues indépendants du système (III.2).

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

On pose

$$\mathbf{W_k} = \mathbf{N_k} \Longrightarrow \int_{\Omega} \mathbf{N_k}.\mathcal{L}(\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i}\tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i})\mathbf{d\Omega} = \mathbf{0} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.6)}$$

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

$$\forall \mathbf{v} \in \mathbf{H_0^1(\Omega)}: \mathbf{a}(\tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f}\ \mathbf{v}\ \mathbf{d\Omega} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.7)}$$

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

$$\mathbf{Lu} = \mathbf{0}\ \mathbf{sur}\boldsymbol{\Omega}\ \mathbf{et}\ \mathbf{u} = \mathbf{0}\ \mathbf{sur}\ \boldsymbol{\partial\Omega} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.8)}$$

➢ III.3. Forme généralisée des équations du système : [75]

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

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{t}}(\boldsymbol{\rho}\mathbf{c}_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}(\boldsymbol{\rho}\mathbf{V_x}\mathbf{C}_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}}\left(\boldsymbol{\rho}\mathbf{V_y}\mathbf{C}_{\emptyset}\emptyset\right) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}}\left(\boldsymbol{\Gamma}_{\emptyset}\frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{y}}\right) + \mathbf{S}_{\emptyset} \ldots\ldots\ldots \text{(III.9)}$$

d'advection transitoire.

$\Gamma_{\emptyset}$: Où :

$\emptyset$: Variable généralisée.

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

$S_{\emptyset}$: Terme source.

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

Variable $\emptyset$	Coefficient d'advection $C_\emptyset$	Diffusivité $\Gamma_\emptyset$	Terme source $S_\emptyset$
V_x	1	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial V}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right).\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}$
V_y	1	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial V}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left(\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}\right).\frac{\nabla C}{\|\nabla C\|}$
T	1	$\frac{K}{\rho C^e}$	$\frac{Q}{\rho C^e}$
ρ	1	0	0

Tableau III.1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[75].**

➢ III.4.choix d'un maillage

La méthode des éléments finis repose sur découpage de l espace selon un maillage d'habitude l'on choisit un maillage carre ou triangulaire mais rien n'in territ de choisir des maillage plus complexe, il n'est pas non plus necessaire que le maillage soit regulier et l'on a tendance a resserrer le maillage pres des endroits d'in teteres (par exemple aux endroits ou l'on pense que la solution va beaucoup varier), cependant il faut veiller à avoir des «éléments faiblement Distordus (se rapprocher d'un polygone régulier), plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la ≪ vraie » solution de l »équation aux dériva ès partiels. même si une géométriquement complexe peut être maillée avec des éléments tétraédriques, elles mais exigent de nombreux éléments et que mai conduire à lécha parce que la simulation des ressources informatiques même un volume de forme régulière mai exigent de nombreux éléments tétraédriques si elle a un ratio très grand aspect ,ici les éléments hexaedres ou d'un coin serait un meilleur choix ,(figure III-2) «objet avec un aspect Ratio large », illustre cette différence, il montre que le nombre (d) éléments tétraédrique (a) est beaucoup plus grand quelle nombre d »élément hexaédrique (b), si une densité de maillage similaire est maintenue sur la section transve

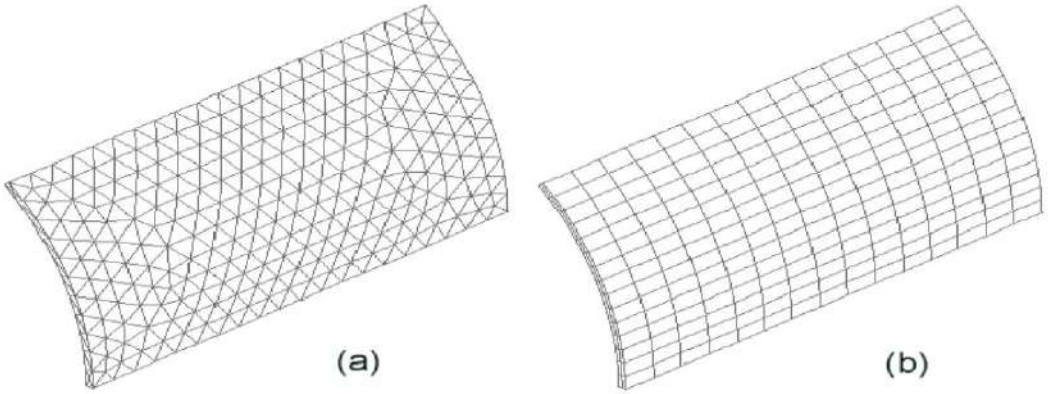


Figure III-2 (a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique
dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma. Thèse de l'université de Limoges,

➢ III.4 .1.discrétisation

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

$$\left(\left[A_e^{transient}\right] + \left[A_e^{advection}\right] + \left[A_e^{diffusion}\right]\right)\{\emptyset_e\} = \{S_e^{\emptyset}\} \quad \text{(III.10)}$$

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

➢ III.4 .2. Terme temporelle

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[75]** :

$$\left[A_e^{transient}\right] = \int W^e \frac{(\partial \rho C_{\emptyset}\emptyset)^e}{\partial t} d(Vol) \quad \text{(III.11)}$$

Avec :

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

Pour le nœud i:

$$\int \mathbf{W_i^e} \frac{(\partial \rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset)^{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{d(vol)} = \int \mathbf{W_i^e} \rho \mathbf{c}_\emptyset \mathbf{W_j^e}\, \mathbf{d(vol)} \frac{\partial \emptyset_\mathbf{j}^\mathbf{e}}{\partial \mathbf{t}} + \int \mathbf{W_i^e} \frac{\partial \rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset_\mathbf{j}^\mathbf{e}}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{W_j^e}\, \mathbf{d(vol)} \emptyset_\mathbf{j}^\mathbf{e} \ldots.\text{(III.12)}$$

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

$$\mathbf{M_{ij}} = \int \mathbf{W_i^e} \rho \mathbf{c}_\emptyset \mathbf{W_j^e}\, \mathbf{d(vol)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.13)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$\mathbf{M_{ij}} = \boldsymbol{\delta_{ij}} \int \mathbf{W_i^e} \rho \mathbf{c}_\emptyset\, \mathbf{d(vol)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.14)}$$

Où :

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

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

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

$$(\boldsymbol{\rho\emptyset})_\mathbf{n} = (\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-1}} + \Delta\mathbf{t}\left(\boldsymbol{\delta}\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathbf{t}}\right)_\mathbf{n} + (\mathbf{1}-\boldsymbol{\delta})\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathbf{t}}\right)_{\mathbf{n-1}}\right)\ldots\ldots\ldots \text{(III.15)}$$

Où :

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

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

$$\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathbf{t}}\right)_\mathbf{n} = \frac{\mathbf{1}}{\Delta\mathbf{t}\boldsymbol{\delta}}(\boldsymbol{\rho\emptyset})_\mathbf{n} - \frac{\mathbf{1}}{\Delta\mathbf{t}\boldsymbol{\delta}}(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-1}} + \left(\mathbf{1}-\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\delta}}\right)\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathbf{t}}\right)_{\mathbf{n-1}} \ldots\ldots\ldots \text{(III.16)}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial \mathbf{t}} = \frac{(\rho\emptyset)_{\mathbf{n-2}}}{\mathbf{2}\Delta\mathbf{t}} - \frac{\mathbf{4}(\rho\emptyset)_{\mathbf{n-1}}}{\mathbf{2}\Delta\mathbf{t}} + \frac{\mathbf{3}(\rho\emptyset)_\mathbf{n}}{\mathbf{2}\Delta\mathbf{t}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.17)}$$

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

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

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

- III.4.3. Terme d'advection

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

- III.4.3.1.Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des lignes caractéristiques. Il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transportée dans un domaine connu de vitesse. Voir Le Schéma III.3: " l'Approche des ligne de courant D'Upwind ".

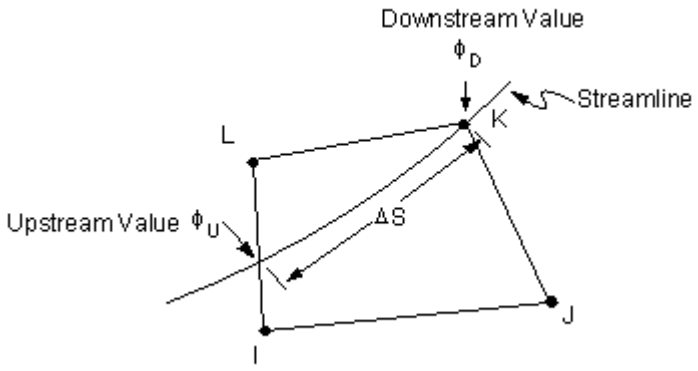


Figure III.3 l'approche de ligne de courant d'Upwind**[75].**

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

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c.-à-d. tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit **[75]** :

$$\frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_x \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_y \emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{\partial s} \quad \text{(III.19)}$$

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_{\emptyset} V_S \emptyset)}{dS} \int W^e d(Vol) \quad \text{(III.20)}$$

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

$$\frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s)}{ds} = \frac{(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_U - (\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_D}{Ds} \quad \text{(III.21)}$$

ou:

D = Indice de la valeur au niveau du nœud aval

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

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

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

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

➢ III.4.3.2. Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection **[75]** :

$$\left[\mathbf{A}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{advection}}\right] = \int \mathbf{W}^{\mathbf{e}} \left\{\frac{\partial(\rho \mathbf{V}_{\mathbf{x}} \mathbf{C}_{\emptyset}\emptyset)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial(\rho \mathbf{V}_{\mathbf{y}} \mathbf{C}_{\emptyset}\emptyset)}{\partial \mathbf{y}}\right\} \mathbf{d(vol)} + \mathbf{C}_{2\tau} \int \frac{\mathbf{Zh}}{2\mathbf{U}_{\mathbf{max}}^{\mathbf{e}}} \left\{\frac{\mathbf{V}_{\mathbf{x}}^{\mathbf{e}} \partial \mathbf{W}^{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V}_{\mathbf{y}}^{\mathbf{e}} \partial \mathbf{W}^{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{y}}\right\} \left\{\frac{\mathbf{V}_{\mathbf{x}}^{\mathbf{e}} \partial(\rho \mathbf{c}_{\emptyset}\emptyset)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V}_{\mathbf{y}}^{\mathbf{e}} \partial(\rho \mathbf{c}_{\emptyset}\emptyset)}{\partial \mathbf{y}}\right\} \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.22)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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

➢ III.4.3.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)

L'approche de COLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué. Dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesses, (les vitesses nodales élément-élément-based) qui sont faites pour satisfaire l'équation de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement **[76]**.

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}}\int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{V_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial W^e}{\partial y}\right\}\left\{\frac{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad \text{(III.23)}$$

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

❖ III.4.4. Terme de Diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au-dessus du domaine de problème après la multiplication par la fonction pesante **[76]**.

$$\mathbf{Diffusion\ contribution} = \int \mathbf{W^e}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\mathbf{d(vol)} + \int \mathbf{W^e}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right)\mathbf{d(vol)}\ldots\ldots \quad \text{(III.24)}$$

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée **[105]** :

$$\int \mathbf{W^e}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)\mathbf{d(vol)} = \int \frac{\partial W^e}{\partial x}\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\mathbf{d(vol)}\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(III.25)}$$

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

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = \mathbf{W_x^e}\emptyset \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(III.26)}$$

$$\mathbf{W_x^e} = \frac{\partial W^e}{\partial x}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(III.27)}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[\mathbf{A_e^{Diffusion}}\right] = \int(\mathbf{W_x^e}\Gamma_\emptyset \mathbf{W_x^e} + \mathbf{W_x^e}\Gamma_\emptyset \mathbf{W_x^e})\mathbf{d(vol)}\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(III.28)}$$

❖ III.4.5. Termes source :

L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[76]:**

$$S_{\emptyset}^{e} = \int W^{e} S_{\emptyset} d(Vol) \text{ …… ……..(III.29)}$$

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

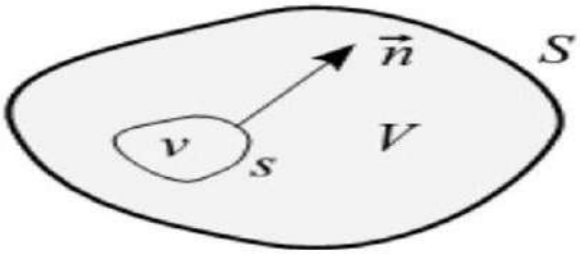


Figure III.4 bilan thermique

❖ 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.

CHAPITRE4

❖ IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'étude de la simulation numériques d'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier comparer avec celle de ; **Mostaghimi [62]** d'autre part, la simulations numériques d'impact deux goutte d'aluminium sur un substrat d'acier passant par une variation de pourcentage de froid dans la goutte. Les résultats faits à partir des simulations numériques à l'aide d'un de code de calcul ANSYS(2011).

❖ IV.2 ANSYS :

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

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

➢ Les points forts des outils ANSYS sont :

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

- Une gestion automatique des assemblages et des contacts.
- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités.

➢ Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux :

- ANSYS Design Scape est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces les constituants.
- ANSYS Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires : mécaniques et thermiques. Il comprend des outils de contrôle avancés tels que les options de contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, les combinaisons de solution, le post traitement de zones de contacts.
- ANSYS Structural et Mechanical permettent d'accéder à tous les types de non linéaire : matériaux, grandes déformations et grands déplacements. Ils sont dédiés à des utilisateurs confirmés qui disposent de connaissances théoriques sur les éléments finis.

➢ Schéma de logiciel ANSYS :

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

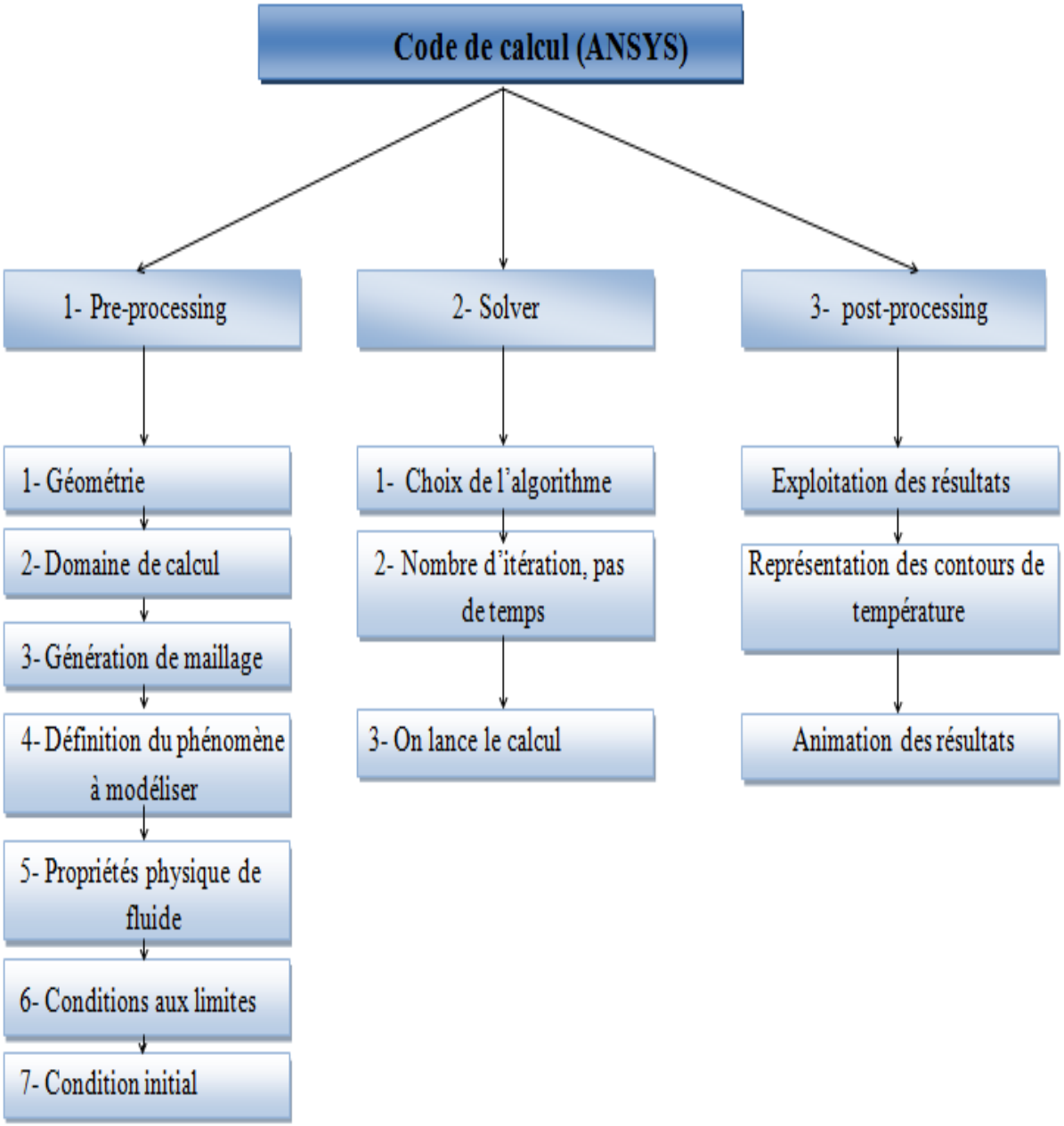


Figure IV.1 *: Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS*

❖ IV.3. Matériaux utilisé :

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

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

➢ IV.3.1. L'aluminium :

Parmi les performances mécaniques et thermiques, que présente l'aluminium oncite**[78,79]**

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

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

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

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

Propriétés	Alliage d'aluminium	Acier d'outil
Densité (kg/m3)	2570	7800
Températurede fusion	750	*
Chaleur de fusion(j/kg)	389	*
Viscosité cinématique (m2/S)	°c 0 4.5 E-7 700 4 E-7	*
Conductivité thermique liquide [W/m K]	70	*
Conductivité thermique liquide [W/m 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 59

❖ IV.4. Identification :

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

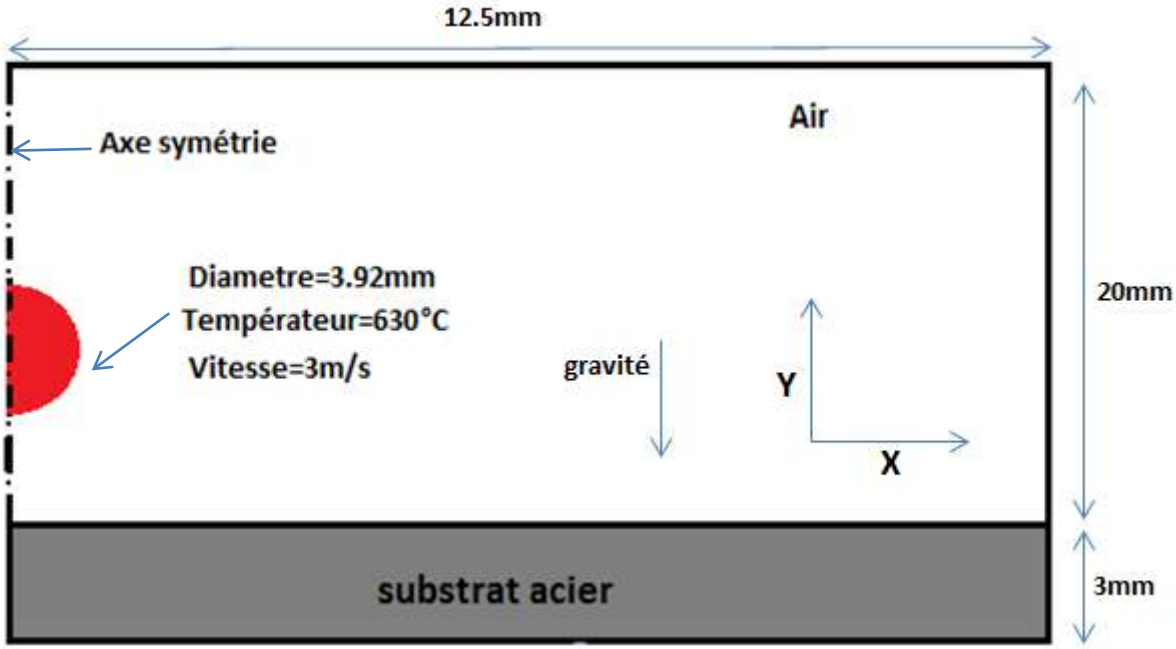


Figure IV– 2 : *configuration géométrique et conditions d'étalement L'identification*

➢ IV.4.1. impact d'une particule d'aluminium totalement fondue :

La figure IV.3 représente les résultats de simulation de l'impact d'une particule en aluminium d'un diamètre de 3.92mm initialement à une température de 630^{o}C et à une vitesse de 3 m/s sur un substrat en acier initialement à 200^{o}C. La gouttelette commence a se propagé à 0.1 ms, le liquide suit la topographie de la surface.

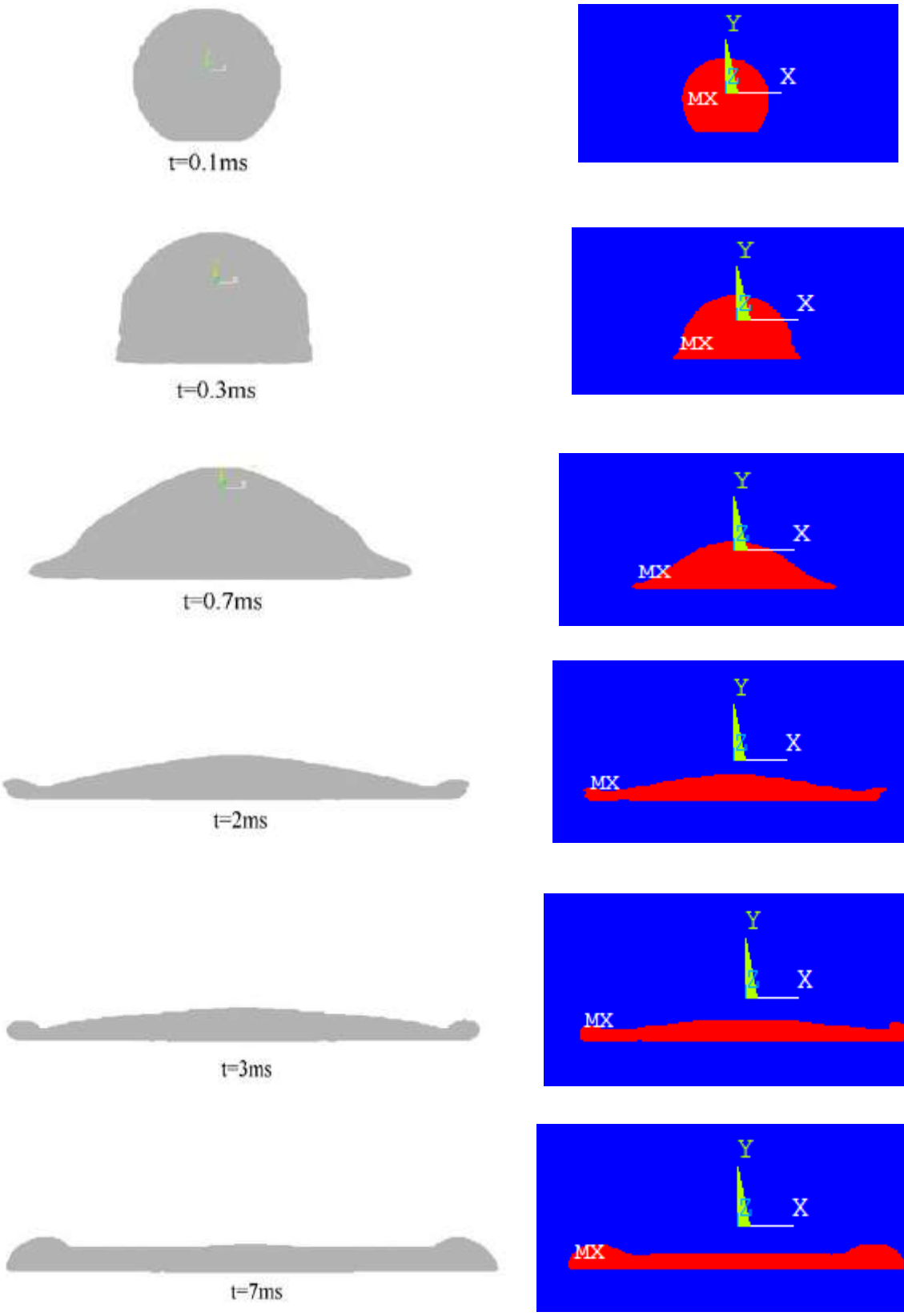


Figure IV.3 : *impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement.*

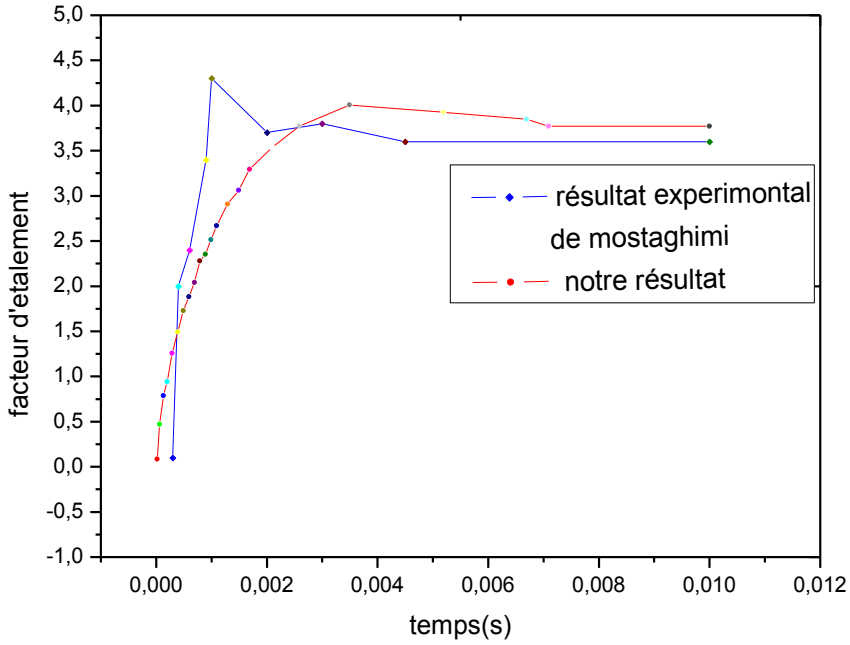


Figure IV.4: *comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions.*

Sur la figure IV- 4, qui est une représentation comparative des facteurs d'impacts pendant Le temps d'étalement de la particule pour les deux cas on trouve presque la même dynamique d'étalement, ainsi que le dimension finale du lamelle formée qui correspond à un facteur de 4 pour les deux cas .

Finalement on peut dire que les deux modèles donnent presque les mêmes résultats.

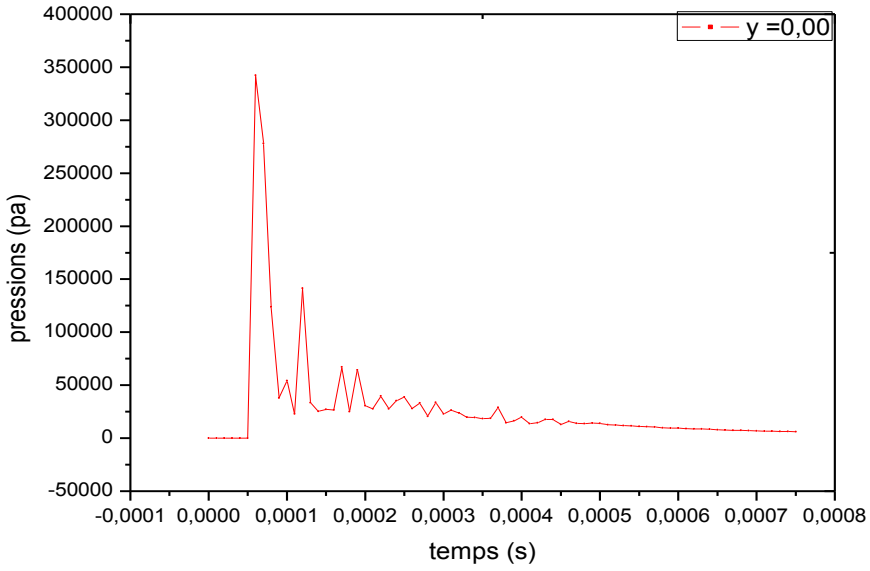


Figure IV-5:*la variation dans le temps de la pression d'impact à l'interface Particule / substrat*

La figure IV-5 qui représente la variation de la pression d'impact au fil de temps, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression (350KPas), nécessaire et suffisante pour un bon accrochage mécanique.

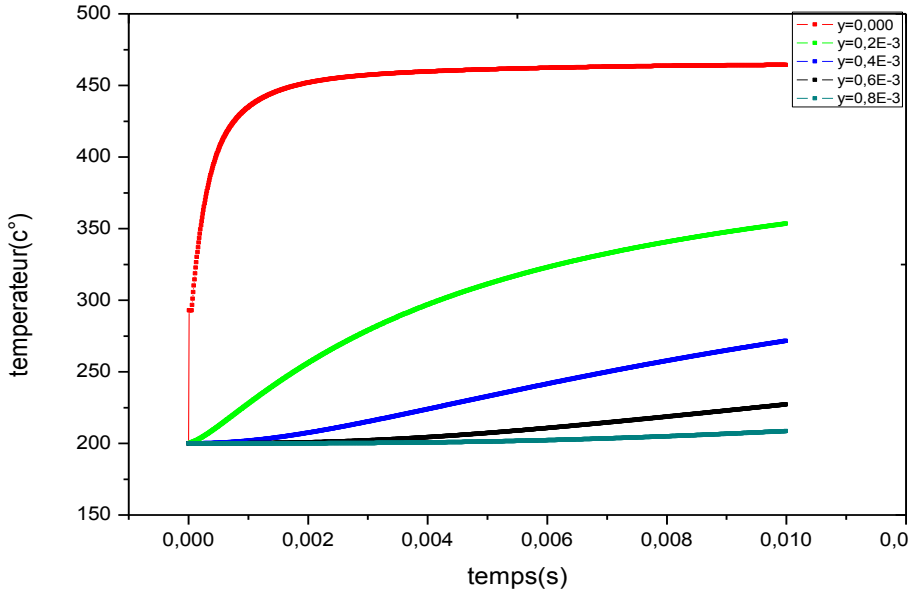
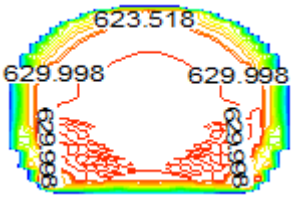
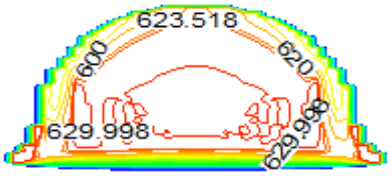


Figure IV-6 : *profiles de température en fonction de temps pourcenque position Au long de substrats verticalement*

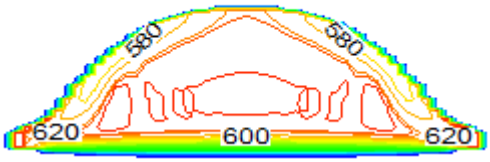
La figure IV-6- représente un comportement identique sur le substrat dès le moment de l'impact jusqu'à la fin d'étalement , on note cependant un comportement relativement similaire dans l'allure de variation, mais la valeur de température pour le point de contact est plus élevées par rapport aux autres point qui le suit .



0.1 ms



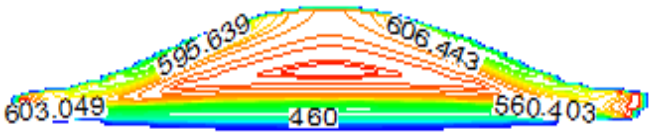
0.3 ms



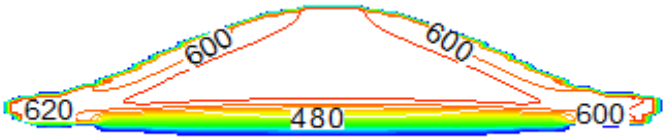
0.5 ms



0.7 ms



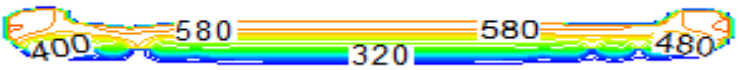
0.9 ms



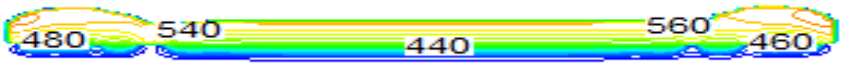
1 ms



3 ms



5 ms



7 ms

Figure IV-7: *distribution de la température lors de l'impact d'une particule d'aluminium initialement avec une vitesse de 3 m/s et une température de630 ℃ sur un substrat initialement a 200 ℃.*

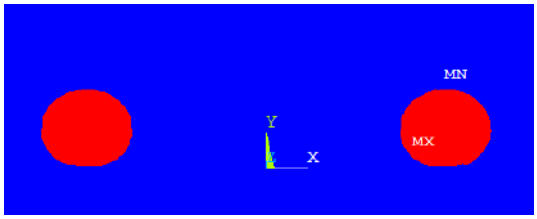
La figure(IV-7) représente la distribution de température pendant l'impact de la gouttelette ou le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observé que les extrémités de lamelle enregistre un retard de refroidissement et de solidification , Ceci est dû au flux radial et à la viscosété d'aluminium

.

❖ IV.5 Description du domaine d'application :

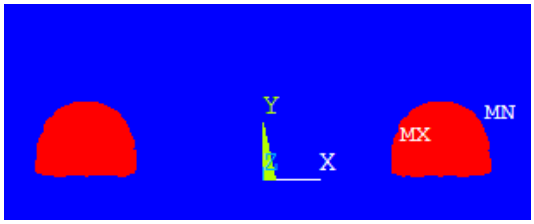
Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact d'une deux particule en aluminium goutte froide de l'intérieur on a quatre cas à présenter (0% - 25% -50% -75%).

➢ **Premier cas :**



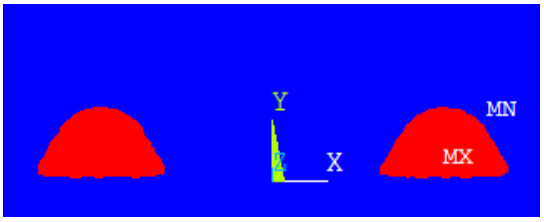


0.1ms



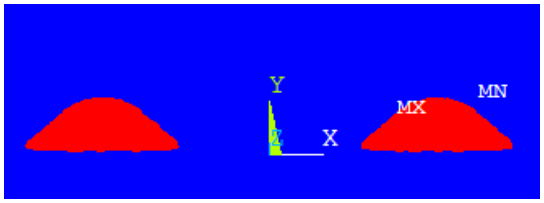


0.3ms



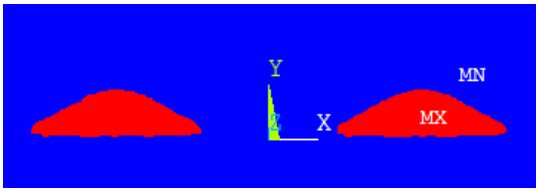


0.5ms



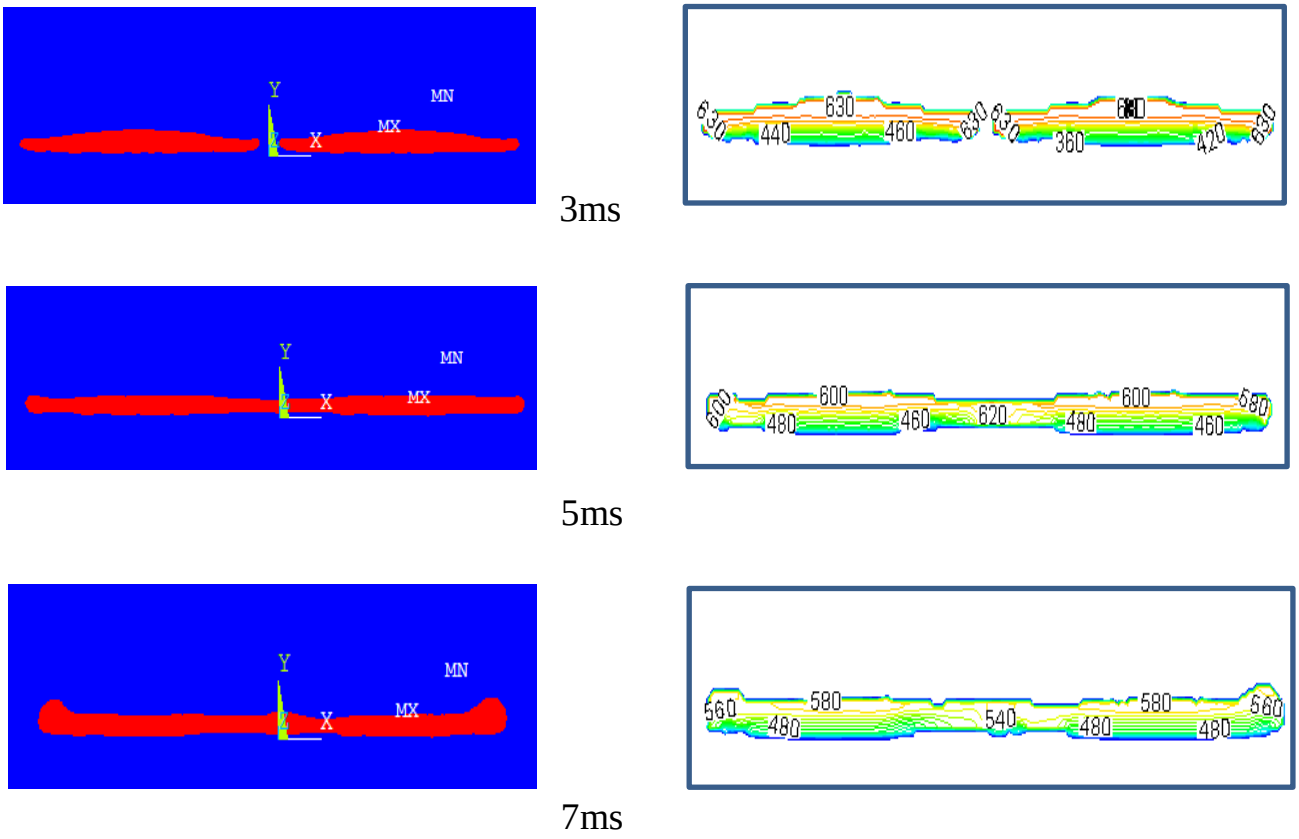


0.7ms





1ms



3ms

5ms

7ms

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

La figure IV.6 représente la distribution de température pendant l'impact d'une goutte à une température de 630°C dans un substrat d'acier à 200°C. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard.

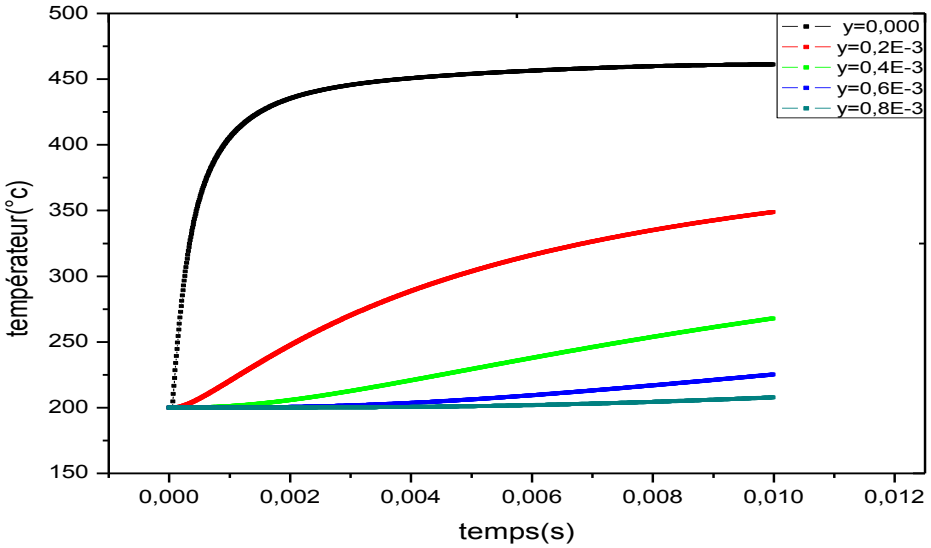


Figure IV-9 : *profiles de température avec le temps premier cas*

La figure IV.9 montre les zones de bonnes et mauvaise contacte à l'interface particule/substrat. D'après cette figure on n'observe que le profil de température pour cinq positions dans le substrat. On note que la température de substrat augment pour les cinq positions

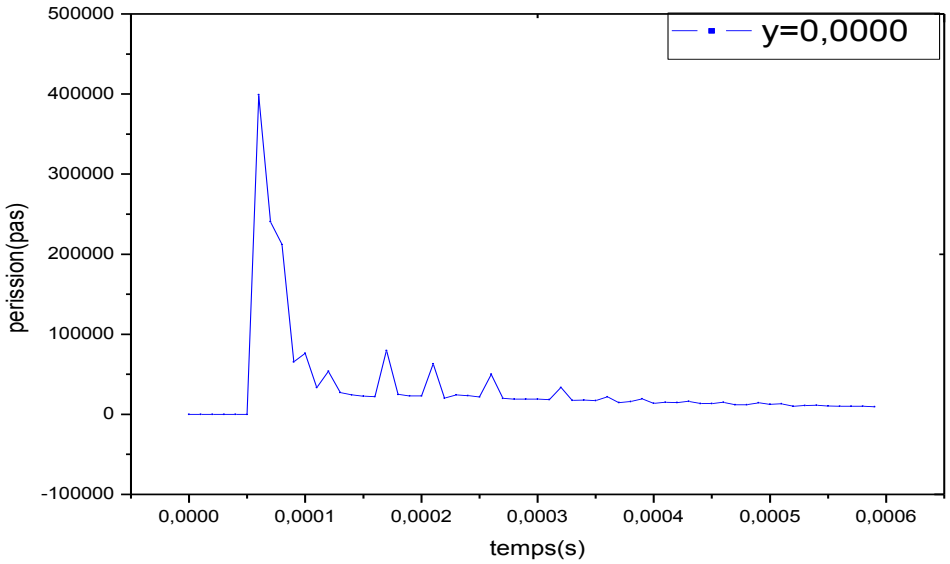
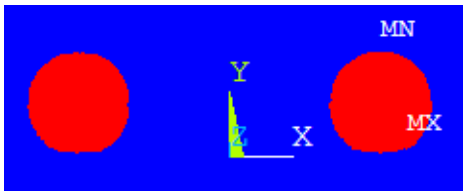


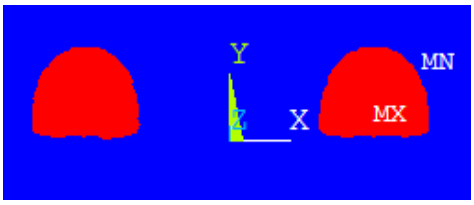
Figure IV-10: *la variation de la pression au point d'impact pour le premier cas*

➢ **Deuxième cas :**



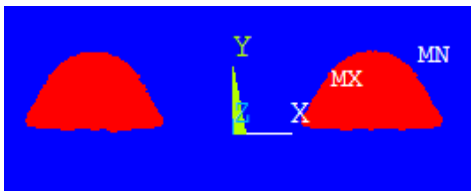


0.1ms



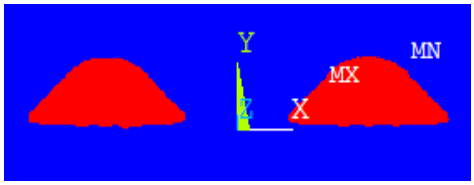


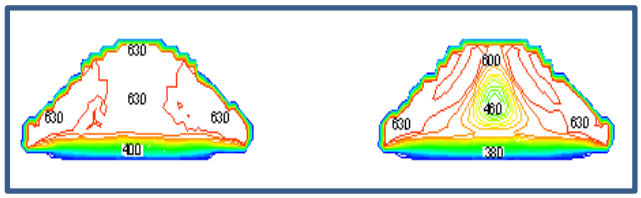
0.3ms



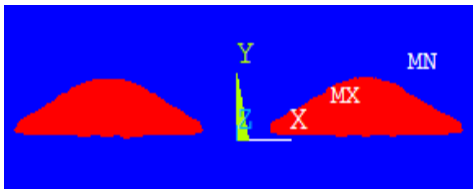


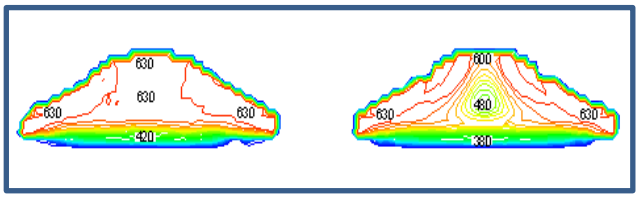
0.5ms



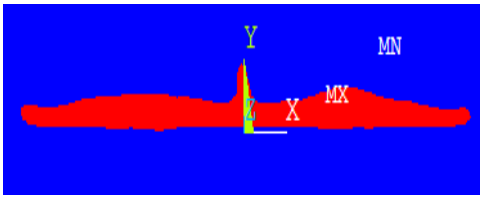


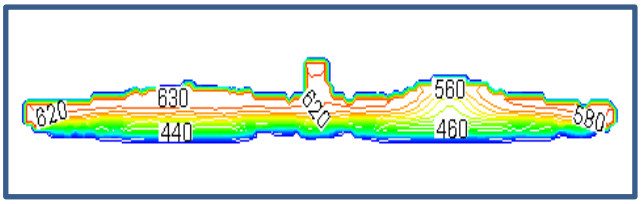
0.7ms





1ms





3ms

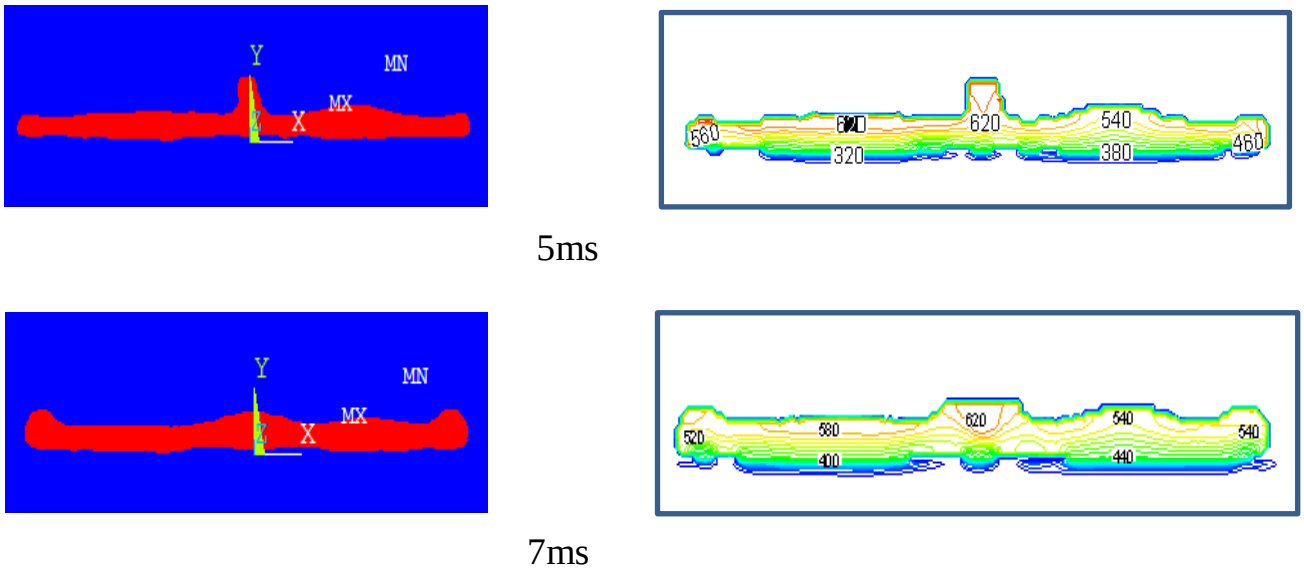


Figure IV.11:distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C

La figure IV.11 représente la distribution de température pendant l'impact d'une particule à une température de 630°C dans un substrat d'acier à 200 °C. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard.

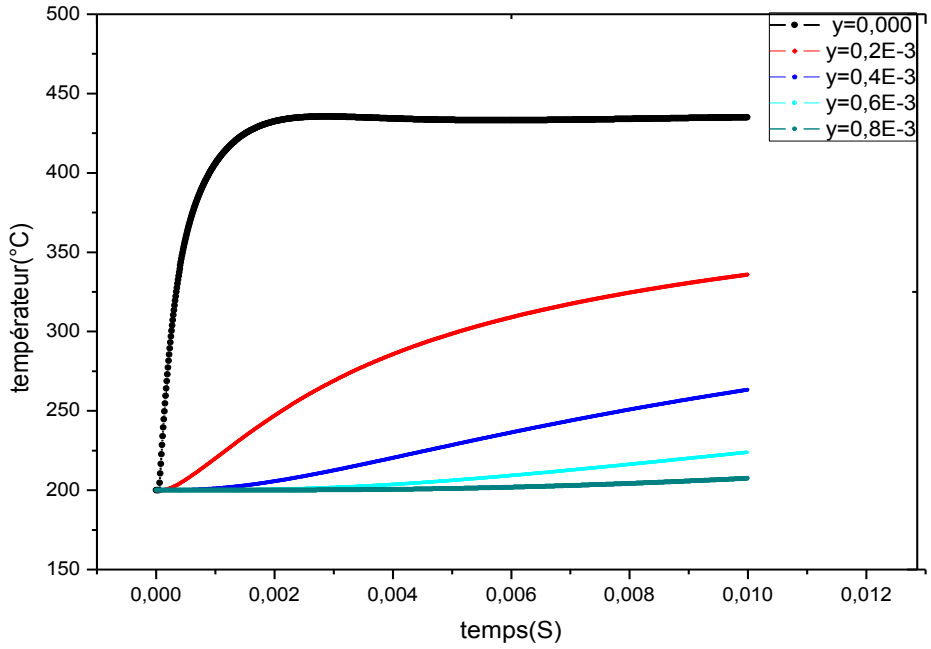


Figure IV-12 : *profiles de température avec le temps dans le deuxième cas*

Dans cette figure IV.12, On note que la température de substrat augment pour les cinq positions mais de manière moins importante que dans le $\mathbf{1}^{ere}$ cas. Cela est peut être causé par l'augmentation du pourcentage de froid dans la particule.

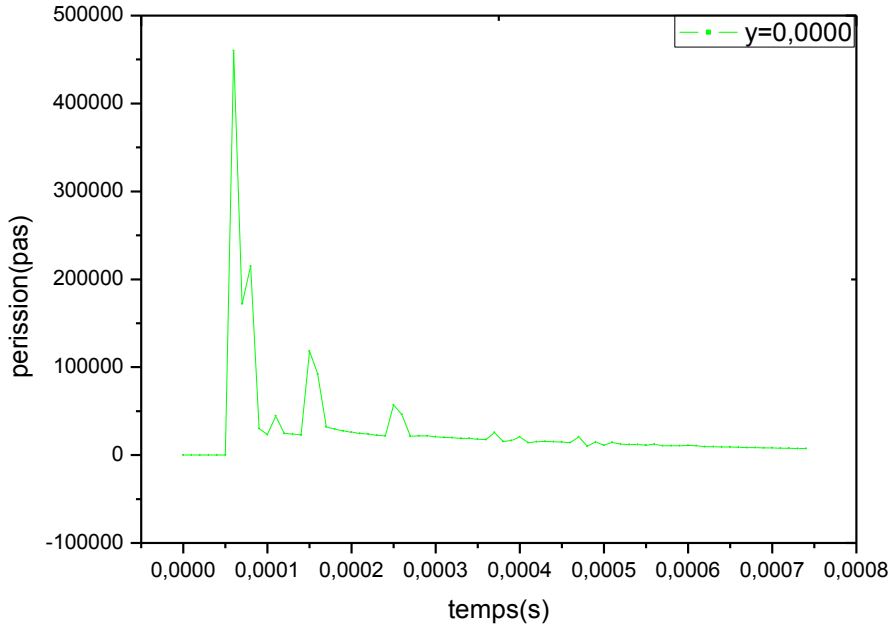
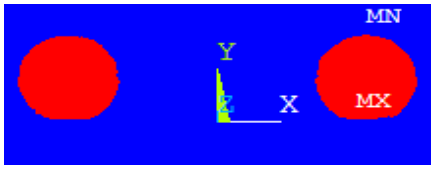


Figure IV-13: *la variation de la pression au point d'impact Pour le deuxième cas*

1. Dans ce cas, la pression augmente très rapidement, avant de rechuter puis regagner l'augmentation.

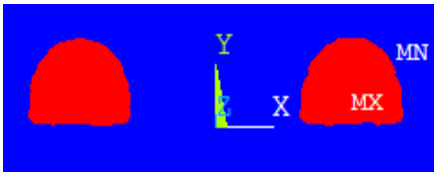
On peut dire donc que la forme normale est plus efficace pour l'amélioration de l'adhérence, c'est à dire pour former un bon dépôt. Alors que les fissures et les défauts de contact sont causés par la froid de la goutte

➢ **Troisième cas :**



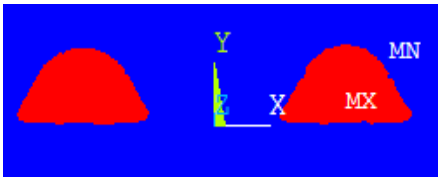


0.1ms



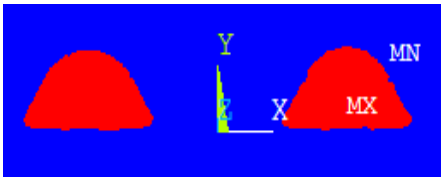


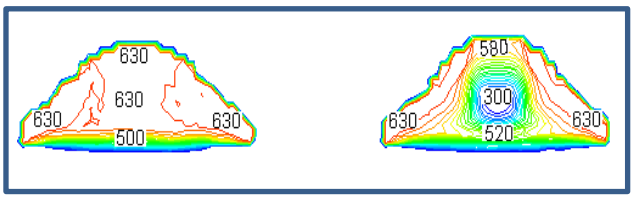
0.3ms



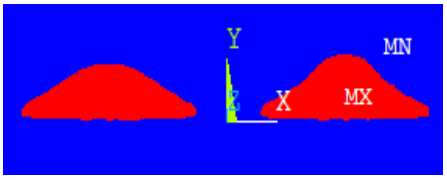


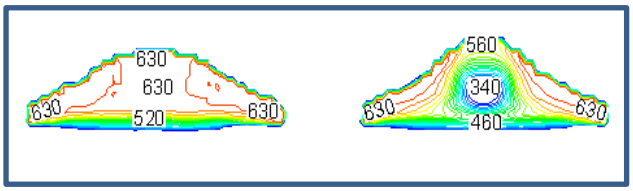
0.5ms



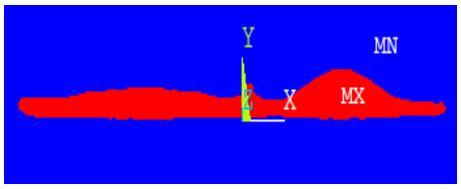


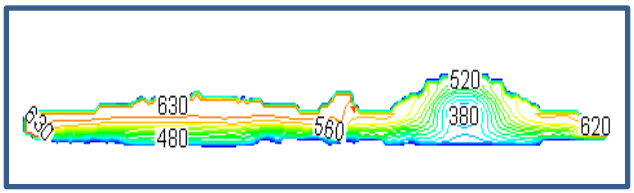
0.7ms



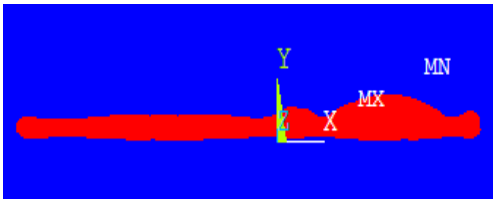


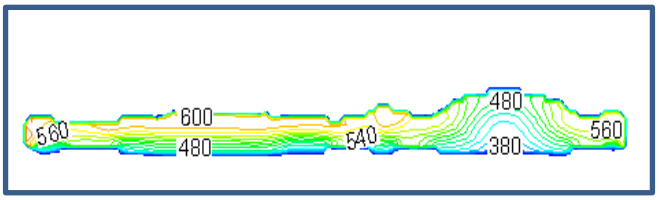
1ms



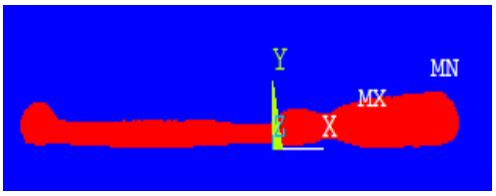


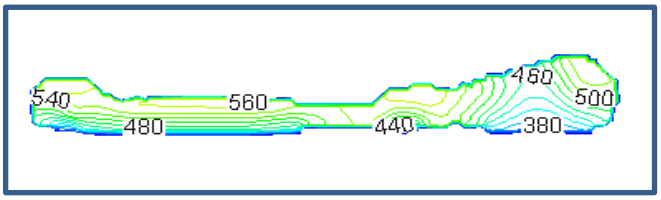
3ms





5ms





7ms

Figure IV.14:*distribution de la température lors de l'impact d'une deux goutte simultané d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C*

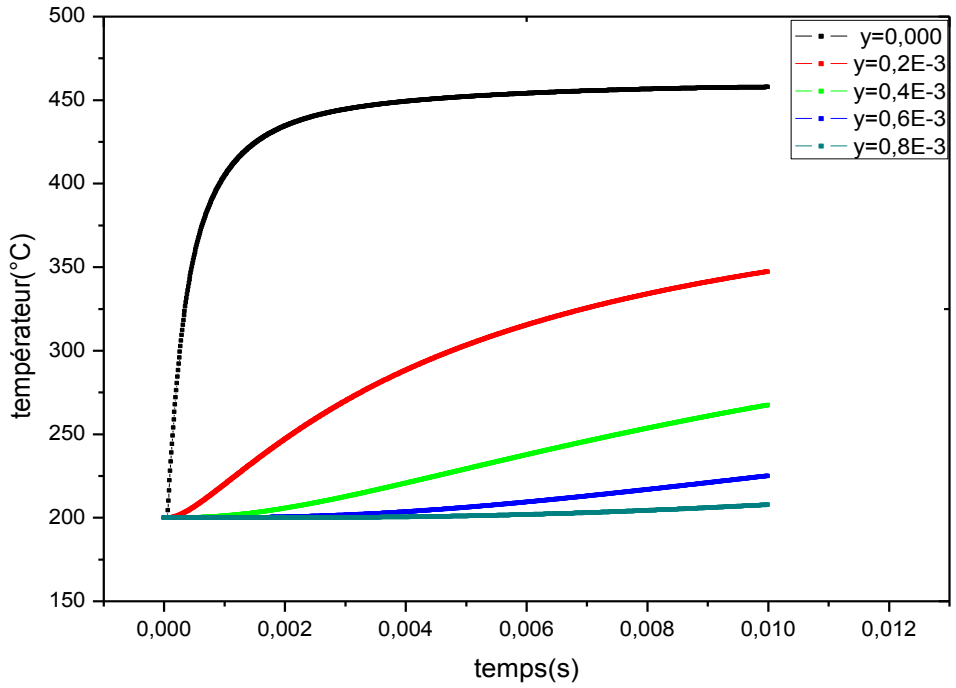


Figure IV-15 : *profiles de température avec le temps dans le Troisième cas*

La Figure **IV.15** représente les profils de température pour cinq positions dans le substrat. On note que la température de substrat augment pour les cinq positions mais de manière moins importante que celle dans la précédente.

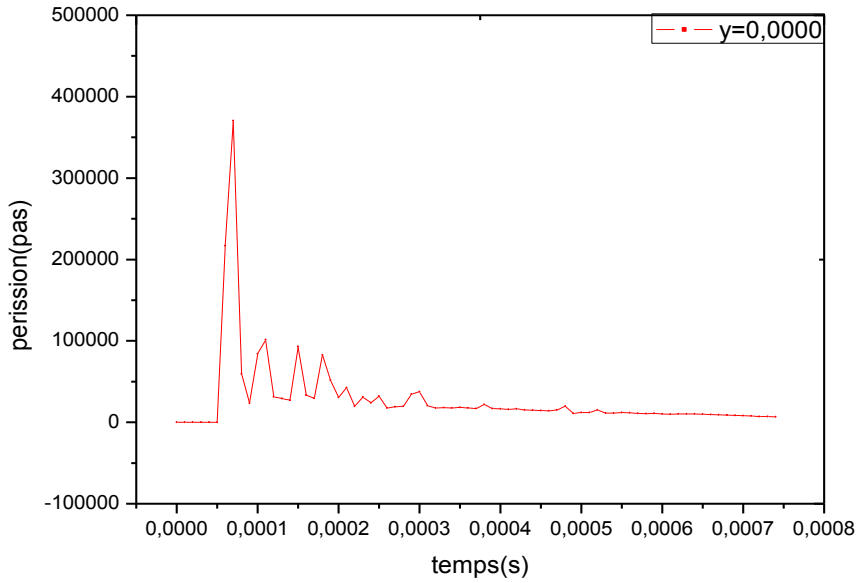
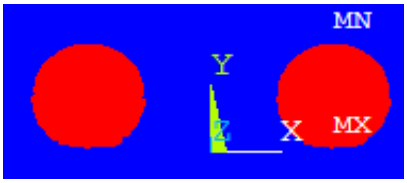
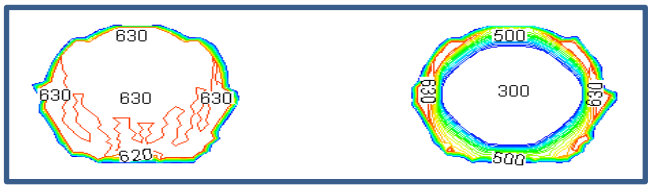


Figure IV-16: *la variation de la pression au point d'impact Pour le Troisième cas*

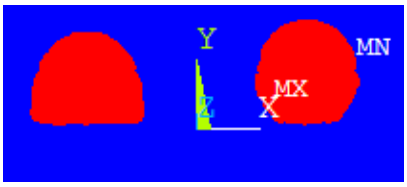
La figure IV.16 représente les résultats numérique des profils de pression le point d'impact nous remarquons aussi, initialement la pression est plus élevé au point d'impact (sous la lamelle) qui produit une faible résistance de contact (bonne interaction goutte /substrat) puis elle se désintègre vers zéro très rapidement.

➢ **Quatrième cas :**



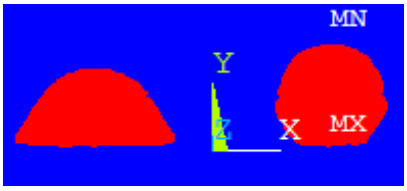


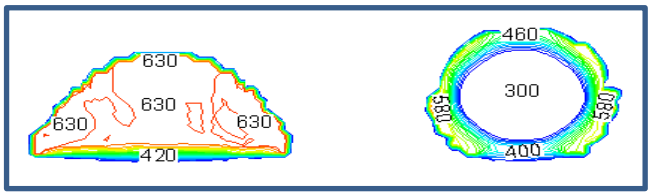
0.1ms



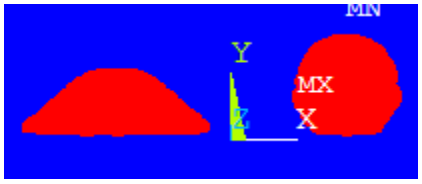


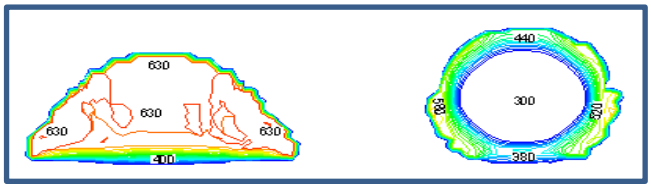
0.3ms



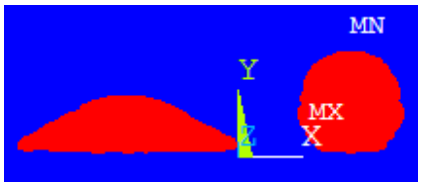


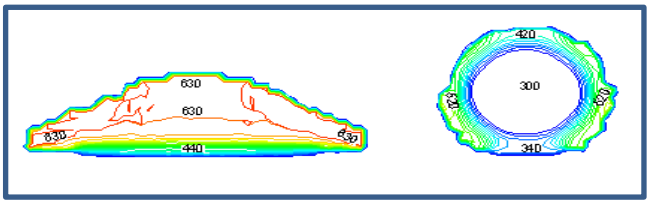
0.5ms



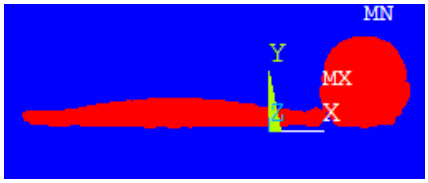


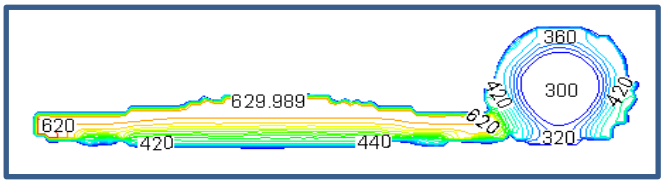
0.7ms





1ms





3ms

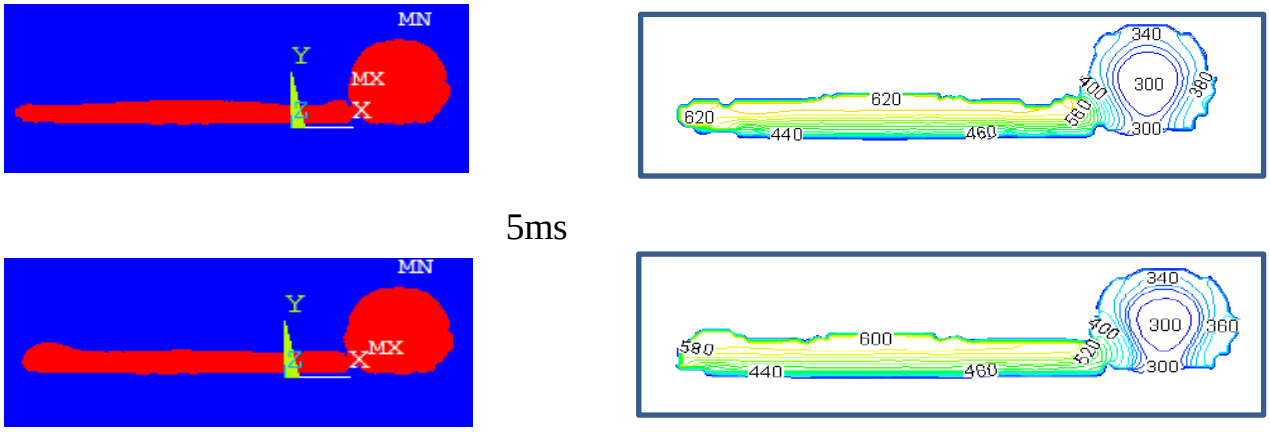


Figure IV.17:*distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C*

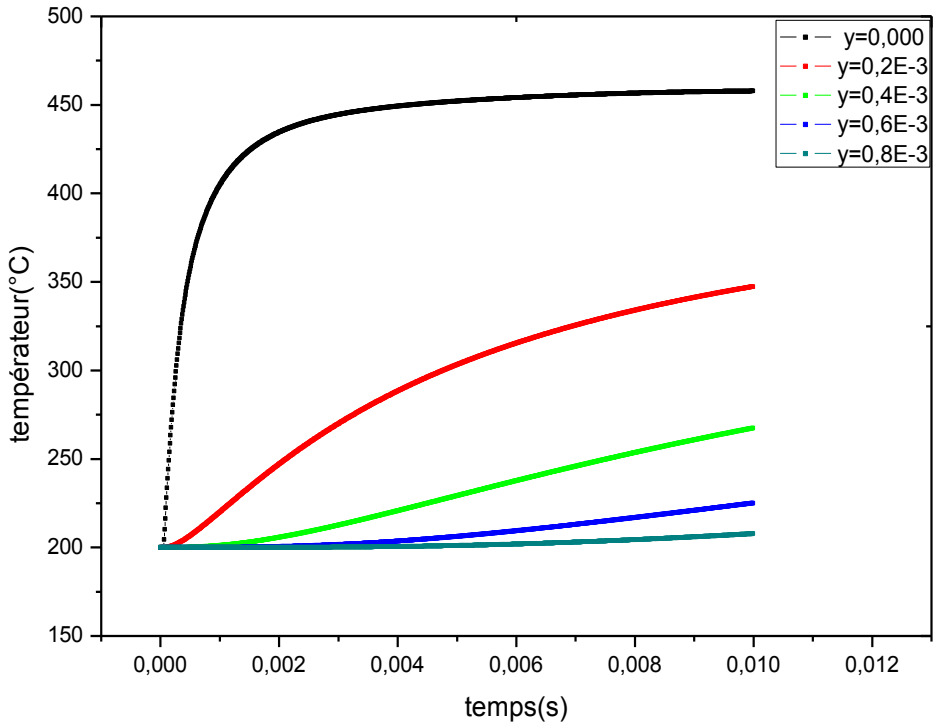


Figure IV-18 : *profiles de température avec le temps dans le quatrième cas*

Les FiguresIV.18représentent les profils de température pour cinq positions dans le substrat respectivement pour le cas d'une goutte On remarque que la température de substrat augmente. On constate également que la température de la goutte dans ce cas est plus faible que dans les cas précédents, expliquée toujours par le pourcentage plus important.

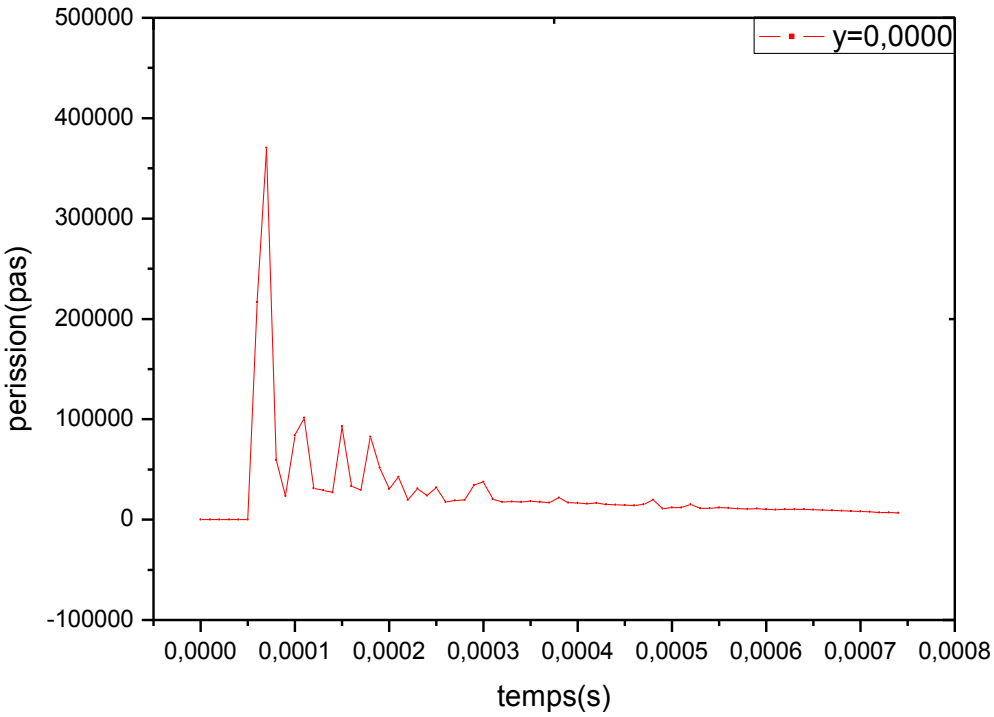


Figure IV-19 : *la variation de la pression au point d'impact Pour le quatrième cas*

La figure IV.19 représente les résultats numériques de la variation de pression dur le point d'impact, la pression de la goutte au point d'impact est moins importante que celle des autres cas, elle atteint **380kPa** au moment d'impact

❖ IV.6 Comparaison entre les 4 cas :

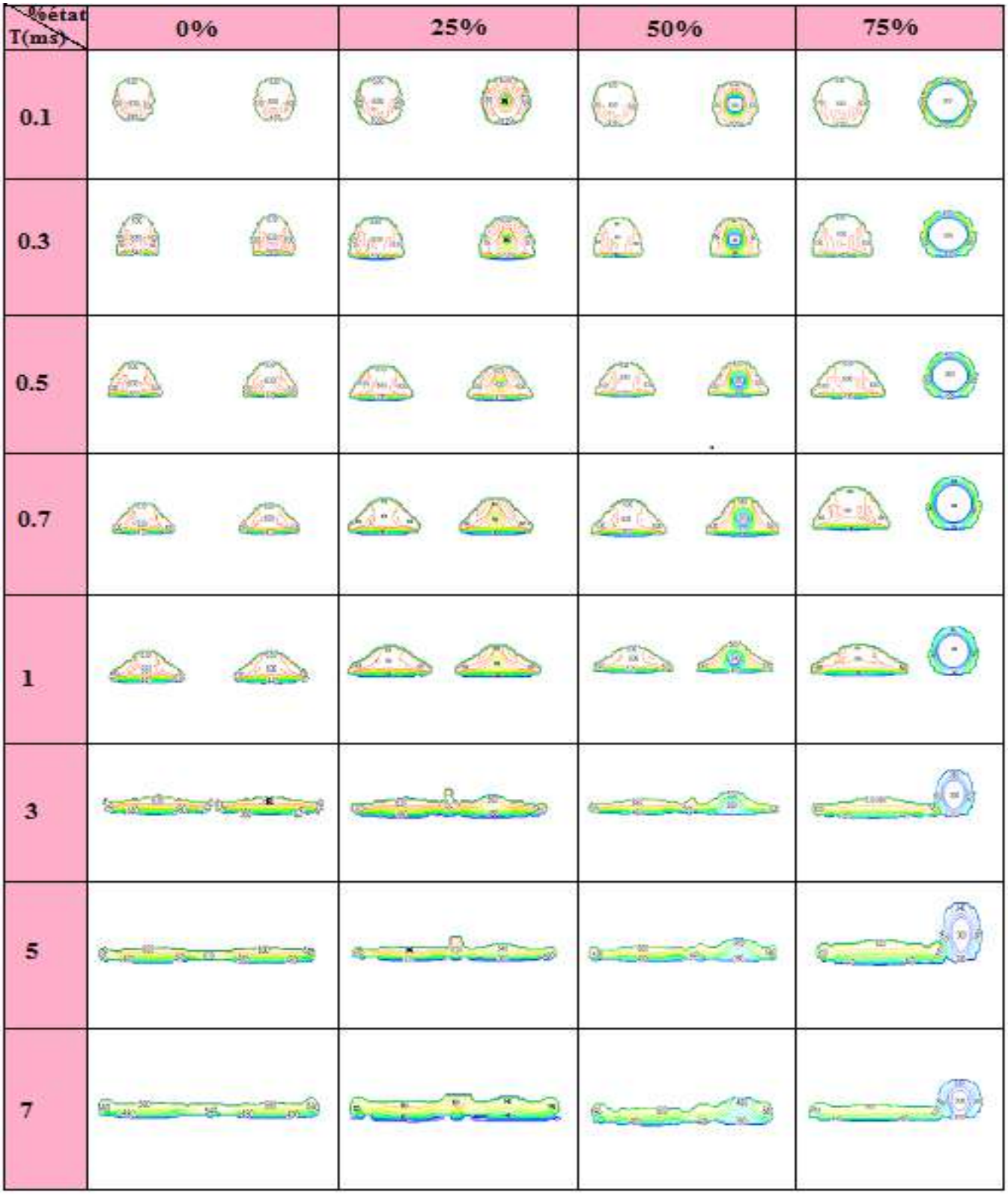


Figure IV-20 : Comparaison des profils de température des quatre cas.

❖ IV.7 Comparaison entre les 4 cas :

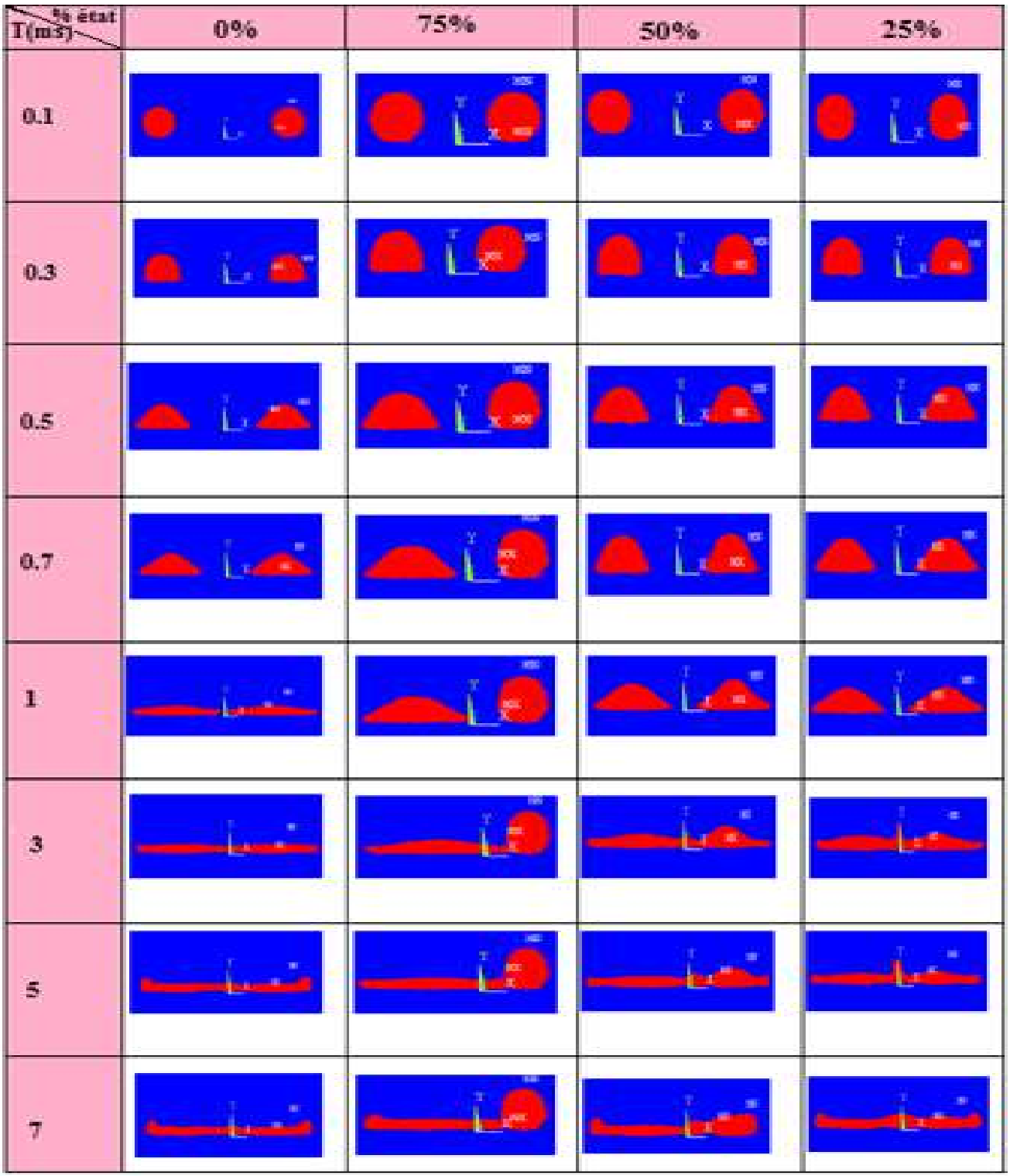


Figure IV-21 : Comparaison de la dynamique de l'impact dans les quatre cas

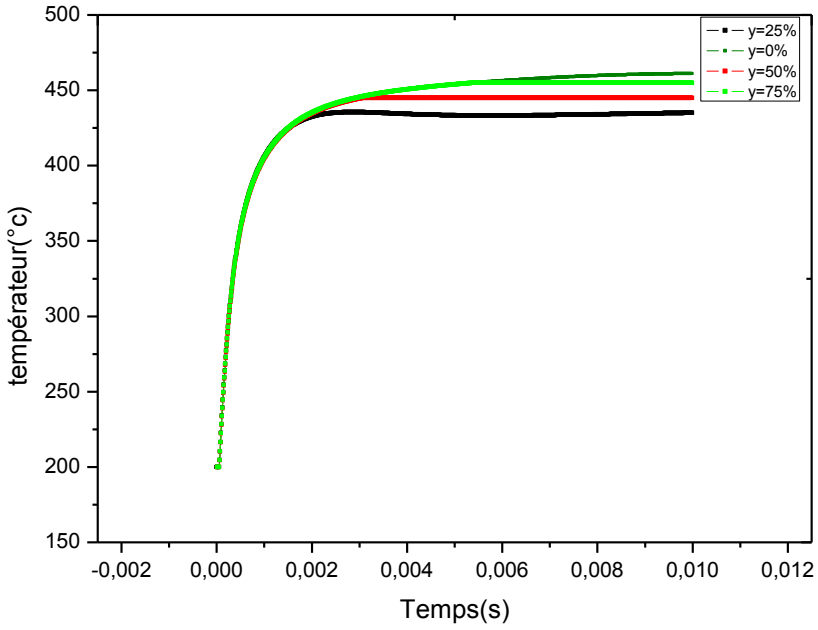


Figure IV-22 : *Comparaison entre les profils de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas.*

La figure IV.21 qui représente une comparaison des profils de température au point de contact entre les quatre cas. On note que la température de substrat augmente un peu plus dans le cas de 75% T=(450°C)que dans les deux autres cas 25% (T=425°C) et 50% (T=475°C). Et on note une température plus moins que dans 0% (T=460°C).

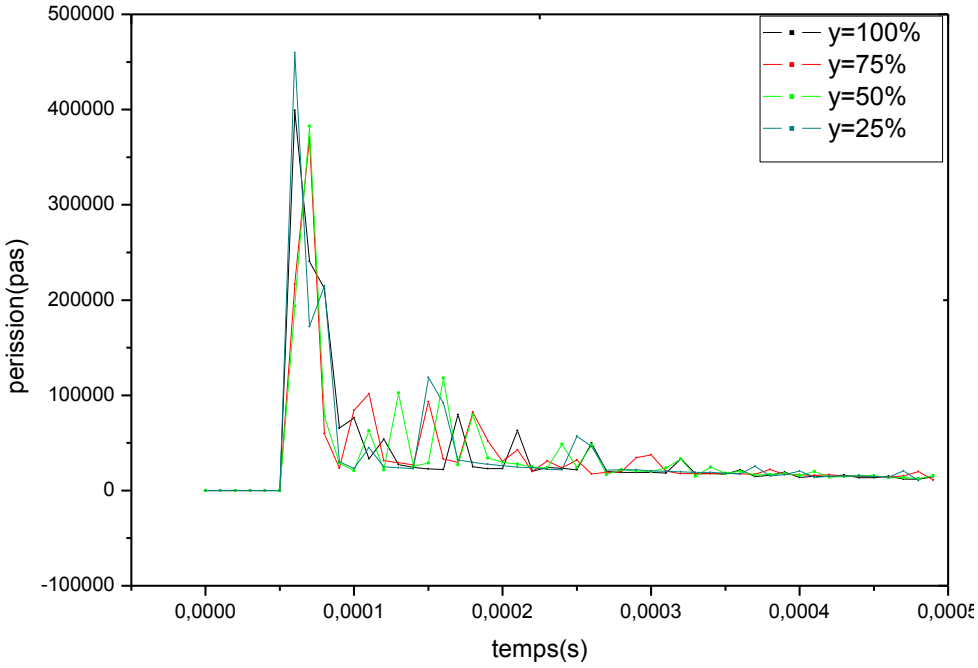


Figure IV-23: *Comparaison de la variation de la pression au point d'impact Pour les quatre cas.*

La figure IV.22 représente une comparaison des profils de pression au point de contact des quatre cas. Où il est clairement marquant que :

- au moment d'impact, l'augmentation de pression est différente pour les quatre de tel que P= 450000Pa pour 0%, P=390000Pa pour 25%, P=3750000Pa pour 50% et P=360000Pa pour 75%.

❖ IV-8. Conclusion :

Ce chapitre traite 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 en peut tirer les conclusion et les caractéristique important qui influence sur l'étalement et la solidification de goutte d'aluminium sur un surface de substrat d'acier, ainsi que la pression d'impact de la particule est liée à l'adhérence au substrat, cependant les particules partiellement fondues génèrent une pression relativement importante par leur temps d'application donc l'état de fusion joue un rôle très important sur la qualité de l'adhérence.et l'état de fusion de la goutte et leur direction initiale à l'impact influe la rapidité de formation de la lamelle finale, et les phénomènes thermiques et mécaniques peuvent modifier cette évolution par l'intervention de la solidification du métal.

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

- dans le premier et le deuxième cas, la pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une bonne d'adhérence entre de goutte /substrat et dans le troisième et le quatrième cas la pression diminue par rapport les cas précédent, Ce qui conduit à une mauvaise adhérence
- La formation de lamelle dans le premier et le deuxième cas est bien étalée et la troisième et le quatrième cas n'pas étalée bien, donc l'état de fusion un rôle important sur la formation de lamelle
- L'état de la goutte selon qu'elle soit **normale** ou **goutte froide a l'intérieur** joue un rôle important sur la morphologie de la lamelle

- Dans le cas de partiellement fondue (25% ; 50% ; 75%) ; il y a un mauvaise étalement spécialement en (75%), et une solidification très rapide de lamelle et la morphologie final complètement déformée.

❖ Conclusion générale

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

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, les paramètres et les caractéristiques, avec un état de l'art sur le sujet de l'impact d'une goutte sur substrat. Les phénomènes hydrodynamiques et thermiques qui interviennent dans le comportement d'une particule fluide isolée qui sont nombreux et suscitent encore de nos jours des interrogations.

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

Dans le chapitre quatre nous vous réaliser des expériences numérique en 2D ,et après une validation de modèle utiliser pour assurer le bon fonctionnement de la simulation, on a étudier l'effet de l'état de fusion d'une goutte impactant simultanément à une deuxième particule partiellement fondue, les résultats montrent que l'état de fusion et par l'effet de la diffusion jouent un rôle primordiale sur la formation de lamelle .

REFERENCE

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

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

[3] : E. Harscoet and D. Froelich, "Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA)", J. Clean. Prod., 16(12), PP 1294-1305, 2007.

[4]:S. Kuroda, T.W. Clyne, The quenching stress in thermally sprayed coatings, Thin Solid Films 200 (1991) 49-66.

[5] : mémoire baham

[6] : http://www.advanced-coating.com/projection-flamme.htm

[7] : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Projection_thermique&oldid=97553172 ». Catégorie :

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

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

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

[11] : http://www.tcpp.fr/html/arcfil.htm

[12]:http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-desurface- des-metaux-par-voie-seche-et-en-milieu-fondu-42360210/revetements-par-projectionthermique- m1645/projection-par-arc-electrique-entre-deux-fils-m1645niv10003.html

[13] : http://www.tcpp.fr/html/arcfil.htm

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

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

[16] 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.

[17]C. Baudry, Contribution à la modèle instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma. Thèse de l'université de Limoges,(2003)

[18] :B. Pateyron, G. Delluc, Logiciel TTWinner, ADEP Banque de données de l'Université

de Limoges et du CNRS. (Ed.) Direction des bibliothèques, des Musées et de l'Information Scientifique et technique, France (1986), téléchargeable sur le site http://www.unilim.fr

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

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

[21] 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.

[22] 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.

[23] S. Sampath, X. Y. Jiang, J.Matejicek, A. C. Leger, A. Vardelle Substrate Temperature Effects on Splat Formation, Microstructure Development and Properties of Plasma Sprayed Coatings. Part I: Case Study for Partially Stabilized Zirconia. Materials Science and Engineering A, 272, 1999, pp.181-188.

[24]C.Mundo, M. Sommerfeld, C. Tropea Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process. International Journal ofMultiphase Flow, 21 (2), 1995, pp.151- 173.

[25] E. Nogues-Delbos Densification de dépôts de zircone yttriée projetés par plasma d'arc Ar-H2 et N2-H2 pour leur utilisation dans l'industrie des semi-conducteurs. Thèse de Doctorat d'Université, Université de Limoges, 2007, 218 p.

[26] J. Cedelle,M. Vardelle, B. Pateyron, P. Fauchais Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation. Proceedings of th 2004 International Thermal Spray Conference, Osaka, Japon, 10-12 mai 2004, (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD-ROM, 6p.

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

[28] 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

[29] 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.

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

[31] M. Vardelle, A. Vardelle, A. C. Leger, P Fauchais, D. Gobin, Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes, J. Thermal Spray Technology, 4 (1), 1994, pp 50-58.

[32] S. Sampath, X.Y. Jiang, J. Matejicek, A.C. Leger, A. Vardelle, Substrate temperature effects on splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings Part I: Case study for partially stabilized zirconia, Material Science and Engineering A, 272, 1999, pp 181-188.

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

[34] E. W. Collings, A. J. Markworth, J. K. McCoy, J. H. Saunders, Splat-quench solidification offreely falling liquid-metal drops by impact on a planar substrate, J. Material Science, 25, 1990, pp 3677-3682.

[35] M. Fukumoto, E. Nishioka, T. Matsubara, Effect of interface wetting on flattening of freely fallen metal droplet onto flat substrate surface, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research, (ed.) C.C. Brendt, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2000, pp 759-765.

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

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

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

[39] D. Bernard, P. Fauchais Influence of the Torch-Substrate Relative Movements and Cooling of the Coatings during Spraying on the Mechanical Properties of TBCs. Thermal Spray Research and Applications, (Ed.) F. Bernecki, (Pub.) ASM International, pp.551-560.

[40] C. J. Li, Y. He, A. Ohmori Characterization of Structure of Thermally Sprayed Coating. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Nice, France, 25-29Mai 1998, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM international, Ohio, USA, pp.717-722.

[41] A. J. Allen, J. Ilavsky, G. G. Long, J. S. Wallace, C. C. Ber Berndt, H. Herman Microstructural Characterization of Yttria Stabilized Zirconia Plasma-Sprayed Deposits using Multiple Small-Angle Neutron Scattering. ActaMaterialia, 49, 2001, pp.1661-1675.

[41] Y.M. Yang, C. Coddet and M. Imbert, Numerical modeling and simulation of particule behaviours in an HVOF supersonic flow. Proc. of the 15th Int. Thermal Spray Conf. 25-29 May1998, Nice, France

[42] F. Rogers, Benefits and Technology Developed to Arc Spray 3/16 inch DiameterWires Used for Corrosion Protection of Steel: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp691-698.

.**[43]** J. H. Clare, D.E. Crawmer, Thermal Spray Coatings in Metallic Coating Processes, in Metal Handbook, 9th Ed.,Vol. 5, Surface Cleaning Finishing and Coating, (pub.) ASM, International, OH USA, 1982, pp361

[44] X. Wang, D. Zhuang, Effect of Atomising Gas Pressure on Coating Properties in Wire ArcSpraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM

[45]: X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Gas Velocity and Particle Velocity on Coating Adhesion in Wire Arc Spraying: Practical Solutions for Engineering Problems, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1996), pp807-811.

[46] M. Mellali, Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma, thèse de l'Université de limoges, 1994.

[47]:R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S. Chandra, M. Charmchi (2003) J Therm Spray Technol 12:53.

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

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

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

[51] C. Ding, J. Li, L. Zhang, X. Yu, Wear Evaluation of Plasma Sprayed Oxide and Carbide Coatings: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp275-278

[52] 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.

[53] Zirari Mounir «Modélisation de la construction d'un dépôt par projection thermique : de la formation d'une lamelle à l'empilement des couches thèse de doctorat, université Saad dahlab, Blida ;Algérie.Park, Ohio, USA, (2003), pp323-327

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[63] 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.

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

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

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

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

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

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

[70] : Les sites :
*http://www.google.moulage.dz.
*http://www.google.moulagesouspression.fr.
*http://www.google. défauts de moulage.fr.
*http://www.google.transfert de chaleur .convection.fr
*http://www.google.méthode volume of fluide.fr
*http://www.google.les méthodes numériques.dz.

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

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

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

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

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

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

[77] C. Baudry, Contribution à la modèle instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma. Thèse de l'université de Limoges,2003

[78]: 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.

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