REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

Université *Dr. YAHIA FARES* de Médéa

Mémoire de projet de fin d'étude pour
L'obtention du diplôme master
En génie mécanique
Option: énergétique et thermique des système

thème

Simulation numérique de l' impact des gouttelettes creuses d'aluminium sur une surface d'acier

Proposé et dirigé par:

- ***Dr : Zirari Mounir***

Présenté par :

- ***BOUHLA Ismail***
- ***SAIDANI Aboubakr***

Promotion 2013/2014

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

- *A mes très chers parents surtout ma mère qui M'ont aidé et encouragé durant toutes mes études.*
- *A mes chers frères et chères sœurs.*
- *A toutes les familles BOUHLA, SAIDANI, et ainsi que tous proches.*
- *A tous mes amis de l'université de Médéa. Surtouts spécialité génie mécanique.*

REMERCIEMENTS

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guider 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.

SOMMAIRE

Dédicaces page

Remerciements

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

I.1- Organigramme de la projection thermique.....3

I.2. Techniques de projection thermique 3

I.2.1. La projection par flamme 4

I.2.1.1. La projection flamme –poudre 4

I.2.1.2 La projection flamme –fil 5

I.2.1.3 La projection supersonique par combustion 5

- le procédé HVOF…….……...5
- le procédé HVAF…….....5

I.2.1.4 Le canon à détonation.....6

I.2.2. La projection par arc électrique 6

I.2.2.1 La projection arc-fil 6

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

I.3. La projection plasma 8

I.3.1. Fonctionnement de la torche à plasma d'arc 8

- Torche à arc transféré..... 8
- Torche à arc soufflé..... …….....8

I.3.1 .1 Amorçage de l'arc 9

I.3.1.2 Le gaz plasmagène 9

I.3.1.3. L'injection des gaz plasmagènes 11

I.3.2. Formation du jet plasma 11

I.3.3. Ecoulement du jet plasma 12

I.3.3.1. Modélisation de l'écoulement 13

I.3.3.1.1. Température de l'écoulement.....13

I.3.3.1.2. Densité et pression de l'écoulement 13

I.3.3.1.3. Vitesse de l'écoulement ……..……..14
I.3.4. Traitement des particules dans le jet plasma ……..…15
I.3.4.1 Injection de la poudre ……..……..……..15
I.3.4.2 Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement plasma-particules……..……....16
I.3.4.2.1 Transfert de quantité de chaleur ……..……..……..16
I.3.4.2 .2 Transfert de quantité de mouvement ……..……..……18
I.4. Comportement de particules…...……..……..……...……20
I.5. Ecrasement des particules sur le substrat ……..……21
- l'impact……..…21
- l'étalement……..22
I.6. La solidification des lamelles ……..……...……...…22
I.7. Formation des dépôts ……..……..23
I.8.d Évolution de la température dans la lamelle et le substrat ……..…23
I.8.1 À Oxydation des substrats ……..…… 24
I.9. Conclusion ..……..……..…...25

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1. Introduction 27
II.2. Modèle dynamique ……..…27
II.2.1. Equation de continuité ……..……...……..…...27
II.2.2. Equation de quantité de mouvement……...……..…....27
II.2.3. Equation de conservation d'énergie ……..……...…28
II.3. modèle thermique ……..……...…29
II.3.1.Transfert de chaleur avec changement de phase ……..……29
II.3.1.1.Méthode a grille mobile ……..……...….29
II.3.1.2.Méthode a grille fixe ……..……..…30
II.3.1.3.Méthode d'enthalpie ……..……..…30
II.3.1.4.Méthode de la chaleur spécifique équivalente ……..…....31
II.3.2.Modèle thermique utilisé ……..……..…....32
II.3.3.Grandes méthodes des discrétisation ……..……...……...32
II.3.3.1. La méthode des différences finies ……..……..……...32
II.3.3.2.La méthode des éléments finis ……..……..…..……...…33
II.3.3.3. La méthode des volumes finis ……..……..……..……....33

SOMMAIRE

II.4.Calcul d'interfaces ……..…….34
II.4.1.les méthodes lagrangiennes ……..……..…34
II.4.2.les méthodes eulérienne ……..……..…..34
II.4.2.1. Les méthodes de suivi de front ……..……...……...…...35
II.4.2.2. Les méthodes de suivi de volume ……..……...……....35
II.4.3. La Méthode VOF CIAM ……..……..……...36
II.5.Conclusion ……..……..……..…36

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

III.1.Introduction …..…….... 38
III.2. Méthodes de discrétisation..... 38
III.2.1 Présentation de la méthode .....…38
III.3.Forme générale des équations du système.....40
III.4. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis..... ……...40
III.4.1. Formulation vibrationnelle forte..... 40
III.4.2 Formulation vibrationnelle faible..... 41
III.5. Discrétisation..... ……..42
III.5.1. Terme temporelle..... ……42
III.5.2. Terme d'advection..... 43
III.5.2.1 Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)..... 43
III.5.2.2 La method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)..... 45
III.5.2.3 Approche Colloquée De Galerkin (COLG)..... 45
III.5.3 Terme de Diffusion..... 46
III.5.4 Termes source..... 46
III.6. Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini..... 47
III.6.1. Bilan Thermique : Equation De Chaleur..... 47
III.6.2. Forme discrétisée : éléments finis……..48
III.6.3. Représentation élémentaire (ou locale) du champ de températures……48
III.7. Conclusion……..……..……50

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction 52
IV.2. Logiciel d'analyse d'ANSYS 52
IV.3. Matériaux utilisés 53
IV.3.1. L'alumine..... 53

SOMMAIRE

IV.3.2. récapitule les prospérité des mâtereaux utilisé dans la simulation……..54
IV.4. Identification.....55
IV.5. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondus 56
IV.6. Description du domaine d'application 58
IV.7. Diamètre de vide d_0 = 25% de D_0..... 59
IV.8. Diamètre de vide d_0 = 50% de D_0..... 70
IV.9. Diamètre de vide d_0 = 75% de D_0……..……80
IV.10. Comparaison entre les trios gouttelette pour chaque (α)……..90
IV.11. Conclusion …….……..……..93
CONCLUSION GENERAL.....95
REFERENCES.....96

LISTE DES FIGURES

- **Figure. I.1:** Organigramme de la projection thermique……..…..3
- **Figure. I.2:** Principe de la projection thermique……....…….…….4
- **Figure. I.3:** schéma du procédé HVOV……....…….....5
- **Figure. I.4:** schéma du procédé canon a détonation……...…..6
- **Figure. I.5:** schéma du procédé arc fil…….....7
- **Figure. I.6:** schéma de principe de la projection par d'arc soufflé……..…....7
- **Figure. I.7:** Torche plasma à arc transféré…….……..…..8
- **Figure. I.8:** Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma…..…..8
- **Figure. I.9:** Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes……...……..9
- **Figure. I.10:** Viscosité en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes……...……...10
- **Figure. I.11:** Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes……...……...……...10
- **Figure. I.12:** schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma……...……11
- **Figure. I.13:** Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant :1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, Ecoulement pleinement développé……..…..12
- **Figure. I.14:** Évolution de la température dans la tuyère (gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin) **…….**13
- **Figure. I.15:** Évolution de la pression dans la tuyère (gaz azote, gaz hélium, modélisation B, Jodoin)……...…….14

- **Figure. I.16:** Iso contours de la vitesse du gaz (azote et hélium) dans la tuyère…….…… 14

- **Figure. I.17:** schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)…….……...….15

- **Figure. I.18:** Schéma des modes de désintégration d'une goutte dans un courant de gaz en fonction de WeG (Selon Pitch et Erdman)…….…..21

- **Figure. I.19:** Figure Influence de vitesse des particules d'alumine projetées par Plasma avant impact sur la morphologie des lamelles……..…...21

- **Figure. I.20:** Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma……...……23

- **Figure. I.21**: schéma de transfert de chaleur entre le splat et le substrat pendant la congélation……...…….24

- **Figure I-22** :(a) Valeurs de Sk pour différentes topographies de surface. (b,c) Evolution de la topographie de surface d'un substrat en acier inoxydable (304L) avant (b) puis après (c) préchauffage……..……24

- **Figure. II.1:** évolution de l'enthalpie en fonction de la température.....31

- **Figure**. **II.2**: La méthode VOF……...……..33

- **Figure**. **II.3**: La méthode lagrangienne et la méthode eulérienne…….….34

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

- **Figure. II.5**: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque…….. 35

- **Figure.II.6**: Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique…….…36

- **Figure. III.**1 : Démarche éléments finis …….....39

- **Figure. III.2** :L'approche de ligne de courant d'upwind…….…..43

- **Figure.III.3** : bilan thermique ……....47

- **Figure III.4** : domaine plan discrétisé en 12 élément relies eux par 15 nœuds.48

- **Figure. III.5 :** Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps ……...….49

- **Figure IV–1 :** schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS…....52

- **Figure IV– 2 :** configuration géométrique et conditions d'étalement de l'identification……..……55

- **Figure IV–3 :** représentation spatiale de la dynamique d'étalement dans les mêmes conditions pour- **A :** résultats expérimental d'Arvind Kumar et la [43] - **B :** notre résultats de calcule…….....56

- **Figure IV- 4 :** facteurs d'étalement…..……...……57

- **Figure IV– 5 :** schéma de principe du domaine informatique……...…58

- **Figure IV- 6 :** schématisation de l'angle caractéristique de l'impact oblique...59

- **Figure IV-7-A-1 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……...……...60

- **Figure IV-7-A-2 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…….61

- **Figure IV-7-A-3 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..61

- **Figure IV-7-A-4 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….…..61

- **Figure** IV-7-A-5 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……...….....…...62

- **Figure IV-7-A-6 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat……...…….……63

- **Figure IV-7-A-7** : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat…….……63

- **Figure IV-7-A-8 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….……..63

- **Figure IV-7-A-9 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……...……...64
- **Figure IV-7-A-10 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…….……..65
- **Figure IV-7-A-11 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……65
- **Figure IV-7-A-12 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte……65
- **Figure IV-7-A-13 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.
  ……...……...……66
- **Figure IV-7-A-14 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…..……..67
- **Figure IV-7-A-15 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat …….…….…….……67
- **Figure IV-7-A-16 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….……... 67
- **Figure IV-7-A-17 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.…….……68
- **Figure IV-7-A-18 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat …….……69
- **Figure IV-7-A-19 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat …….…….……69
- **Figure IV-7-A-20** : Résultats de facture d'étalement pour la goutte….……69
- **Figure IV-7-B-1 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium. ……70
- **Figure IV-7-B-2 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat...…….……..71
- **Figure IV-7-B-3 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..……71

- **Figure IV-7-B-4 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….....71
- **Figure IV-7-B-5 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……..72
- **Figure IV-7-B-6 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…….……..73
- **Figure IV-7-B-7** : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat…… 73
- **Figure IV-7-B-8 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….…..73
- **Figure IV-7-B-9 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.……74
- **Figure IV-7-B-10 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…..……..75
- **Figure IV-7-B**-11 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..……75
- **Figure IV-7-B-12 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….…....75
- **Figure IV-7-B-13 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium. ……..……76
- **Figure IV-7-B-14 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat……..……..77
- **Figure IV-7-B-15 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..……77
- **Figure IV-7-B-16 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….……77
- **Figure IV-7-B-17 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.…..……78
- **Figure IV-7-B-18 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…….…….……79

- **Figure IV-7-B-19 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..……79
- **Figure IV-7-B-20 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte….……....79
- **Figure IV-7-C-1 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……...……...80
- **Figure IV-7-C-2 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat……..…….81
- **Figure IV-7-C-3 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..81
- **Figure IV-7-C-4 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…….……..81
- **Figure IV-7-C-5** : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……..……82
- **Figure IV-7-C-6 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat……...……..…….83
- **Figure IV-7-C-7 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……..…….83
- **Figure IV-7-C-8 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte….……..83
- **Figure IV-7-C-9 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium. ……..……84
- **Figure IV-7-C-10** : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat……..85
- **Figure IV-7-C-11 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat…….…….….85
- **Figure IV-7-C-12 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte……..85
- **Figure IV-7-C-13 :** distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium……...……..86
- **Figure IV-7-C-14 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat…….……..87

- **Figure IV-7-C-15 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……...…….87
- **Figure IV-7-C-16 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte…..……87
- **Figure IV-7-C-17** : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.…….…….…..88
- **Figure IV-7-C-18 :** la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat……..89
-
- **Figure IV-7-C-19 :** profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat……89
- **Figure IV-7-C-20 :** Résultats de facture d'étalement pour la goutte……..89
- **Figure IV-8 :** la variation de la préssion d'impact au point de l'interface particule / substrat dans un trio goutte creuse a différant pour d_0 entre chaque (α)……....90
- **Figure IV-9 :** Résultats de simulation pour les profils de température sur la surface de substrat dans trios goutte creuse a différant pour d_0 entre chaque (α)…….**.....**91
- **Figure IV-10 :** Comparaison entre les facture d'impact dans chaque (α) pour les trios cas…….92

LISTE DES TABLEAUX

- **Tableau 1-1 :** Rappel de quelques nombres caractéristiques de l'écoulement plasma et des splats (sans dimension)…….22

- **Tableau III.1** : Tableau de Représentation d'équation de transport……....40

- **Tableau VI -1** : propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13……...54

NOMENCLATURE

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

- k_{th} : La conductivité thermique $Wm^{-1}.K^{-1}$
- K_n : Le nombre de Knudsen,
- K_p : La conductivité thermique du matériau $Wm^{-1}.K^{-1}$
- 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
- $S_\emptyset$: 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
- T_α : 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)
- Δs : La distance du point situé en amont à l'aval du nœud m

- $\emptyset$: Variable généralisée
- Δ : coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark
- λ : Le libre parcours moyen m
- γ : le terme correctif.
- $\Gamma_{\emptyset}$: 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 : est le degré d'étalement maximum

Résumé :

Malgré de nombreux travaux théoriques et expérimentaux sur l'interaction des gouttelettes / substrat lors de l'impact et étalement pendant le processus de revêtement par projection thermique, la dynamique de l'impact des gouttelettes creuse et la formation subséquente du lamelle ne sont pas bien pris en compte. Dans cette étude on a proposer d'étudier l'impact des particules en aluminium creuse a différant % de vide (25%,50%,75%), ainsi que l'étude de l'influence de l'angle d'impact (impact oblique). Le modèle d'impact estime la dynamique d'écoulement et le passage lors de l'impact (d'étalement et de la solidification de la goutte), Dans ce cas en à utiliser la méthode d'élément finis sous le logiciel de calcule (ANSYS).Le modèle en 2D cartésien permet d'étudier l'impact, l'étalement et la solidification de la particule. ou on a constaté l'influence directe de la présence de vide et l'angle d'impact sur la formation de lamelle.

Mots clés :

Simulation numérique, éléments finis, modélisation, écoulement, VOF, métal, impact, goutte, solidification, lamelle, ANSYS.

موجز:

على الرغم من العديد من الدراسات النظرية والتجريبية على تفاعل قطيرة / الركيزة اثناء الانتشار خلال عملية طلاء الرش الحراري، لا تؤخذ ديناميكيات تأثير قطرات جوفاء وتشكيل لاحقة من الصفيحة بعين الاعتبار .في هذه الدراسة نقترح جزيئات من الألومنيوم جوفاء ويختلف ٪ الفراغ (25٪، 50٪، 75٪)، وكذلك دراسة تأثير زاوية الأثر (أثر منحرف). وتشير تقديرات نموذج تأثير تدفق الحيوية وإقراره خلال تأثير (نشر وترسيخ قطرة)، وفي هذه الحالة باستخدام طريقة العناصر المحددة في البرنامج بحساب (ANSYS). نموذج الديكارتي D2 يسمح لدراسة تأثير، ونشر وترسيخ للجسيمات. و هناك تأثر بشكل مباشر من خلال وجود الفراغ وزاوية التأثير على تشكيل الصفيحة

الكلمات الرئيسية :

المحاكاة العددية، العناصر المنتهية ، الرش الحراري ، الأثر، الصفيحة ، التصلب، الحبرية ،.ANSYS

SUMMARY:

Despite numerous theoretical and experimental studies on the interaction of droplet / substrate upon impact and spread during interaction the impact of metal droplets on the substrate during the process of thermal spray coating, the dynamics of the impact of hollow droplets and the subsequent formation of the lamella are not taken into account. In this study we propose to study the impact of a hollow aluminum particles differing% vacuum (25%, 50%, 75%) as well as the study of the influence of the angle of impact (oblique impact). The impact model estimates the dynamic flow and passage during the impact (spreading and solidification of the drop). In this case using the finite element method in the software calculates (ANSYS). 2D Cartesian model allows studying the impact, spreading and solidification of the particle. Or there has been directly influenced by the presence of empty and the angle of impact on the formation of lamella.

Keywords:

Numerical simulation, finite element modeling, flow, VOF, metal, impact, drop, solidification, strip, ANSYS

Introduction Générale

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

Dans cette étude ou s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact dynamique couplé au refroidissement avec solidification, et en première lieu en choisi des particules en aluminium Creuse a différant diamètre de vide appliquée à (25%,50% et 75%). Au deuxième lieu nous étudions l'influence de l'angle d'impact (l'impact oblique) sur la formation de la malle.

Notre travail est présenté en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est conscient à la définition des paramètres influence sur la formation des dépôts de l'injection des particules dans le jet j'jusqu'à la formation de la malle c'est à dire la projection thermique est ces différentes procédés, l'écoulement du jet plasma ainsi que l'impact, l'étalement et la solidification de la lamelle.

- Dans Le deuxième chapitre nous exposons les différant méthodes et modèle mathématique utilise pour expliquer le physique des écoulements diphasique des fluides non miscible. 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 quatrième chapitre nous avons présenté les résultats de simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact et la solidification des gouttes creuse

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

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

I.1. Organigramme de la projection thermique :

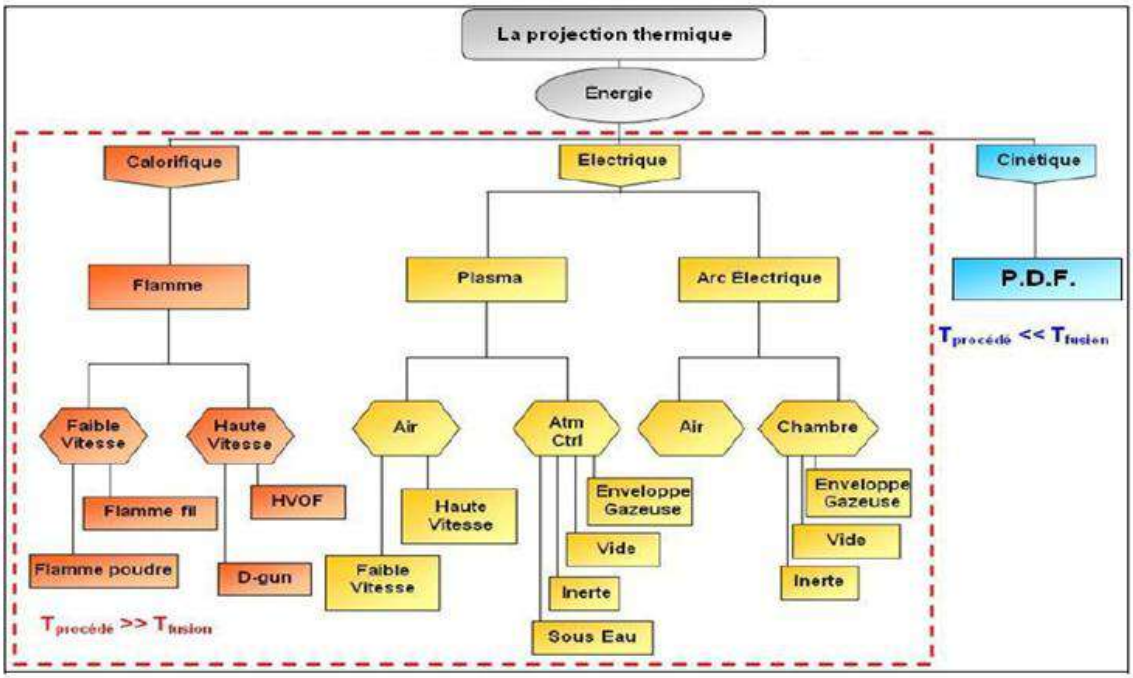


Figure I-1 : Organigramme de la projection thermique [1,2]

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. **[1,2]**



Figure I-2 : Principe de la projection thermique [3]

I.2.1. La projection par flamme :

Dans ce type de projection thermique, une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre soit sous forme de fil, de tige ou de cordon (pour les céramiques dans ces deux derniers cas). Dans le premier cas, la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme alors que dans le second, il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme. Les matériaux déposés par cette technique sont usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion. **[4,5]**

I.2.1.1 La projection flamme –poudre :

Le matériau à projeter est introduit sous forme de poudre dans une flamme oxygène gaz combustible, les particules sont accélérées grâce au gaz porteur ou à une injection d'air. Les dépôts réalisés présentent une faible adhérence (de 20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %), ceci est essentiellement dû aux faibles vitesses d'impact des particules (de l'ordre de 30 m/s).

I.2.1.2 La projection flamme –fil :

Le matériau est conditionné sous forme de fil ou de tige et entraîné dans la flamme par des rouleaux placés à l'arrière de la torche. Ces rouleaux sont actionnés par un moteur électrique ou un moteur pneumatique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme (T fusion = 0,95 T flamme). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al2O3, Al2O3-TiO2, ZrO2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

I.2.1.3 La projection supersonique par combustion :

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

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

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

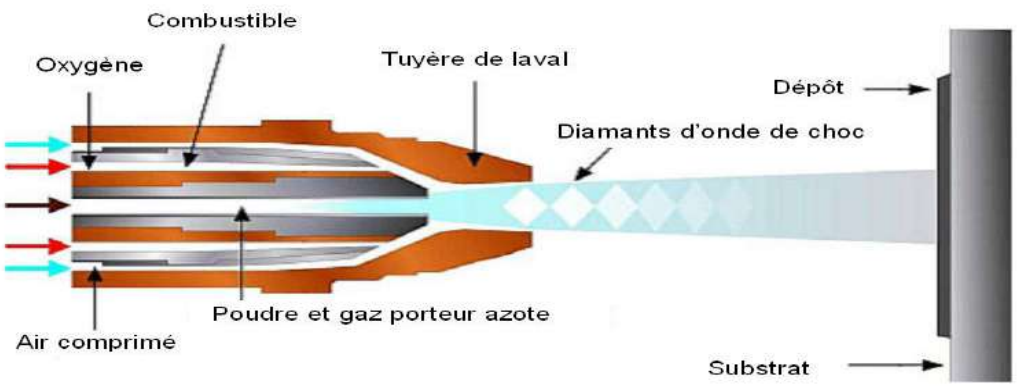


Figure I-3 : schéma du procédé HVOV. [6]

I.2.1.4 Le canon à détonation :

Le matériau d'apport, sous forme de poudre, et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits pratiquement en même temps dans un tube (tube de détonation) fermé à une extrémité. Grâce à une étincelle le mélange de gaz explose créant une onde de choc maintenue par la combustion. L'évacuation du gaz brulé, l'introduction du gaz explosif frais ne permet de renouveler l'explosion que jusqu'à 8 fois par seconde. Les particules de poudres sont ainsi chauffées et éjectées à une grande vitesse (jusqu'à 1200 m.s-1) par l'onde de choc créée qui se déplace à des vitesses pouvant atteindre 2900 m.s-1. Les dépôts obtenus sont compacts (porosité inférieure à 1 %), de bonne adhérence (généralement supérieure à 80 MPa) et de faible rugosité (Ra = ± 3 µm). Les taux de dépôt horaires sont compris entre 3 et 5 kg.h-1 et l'épaisseur de dépôt est généralement inférieure à 0,2 mm. Ce procédé présente des contraintes aux niveaux des installations (dimensions, bruit de plus de 140 dB,…) ce qui réserve son utilisation à des sites spécialisés. **[7]**

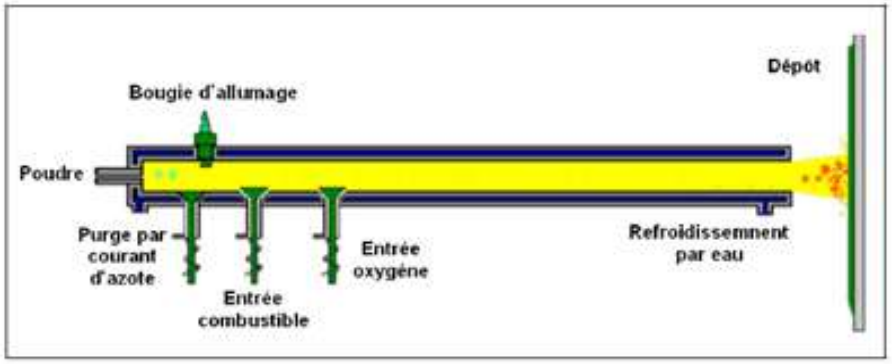


Figure I-4 : schéma du procédé canon a détonation

I.2.2. La projection par arc électrique :

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

I.2.2.1 La projection arc-fil :

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 40 MPa. 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.

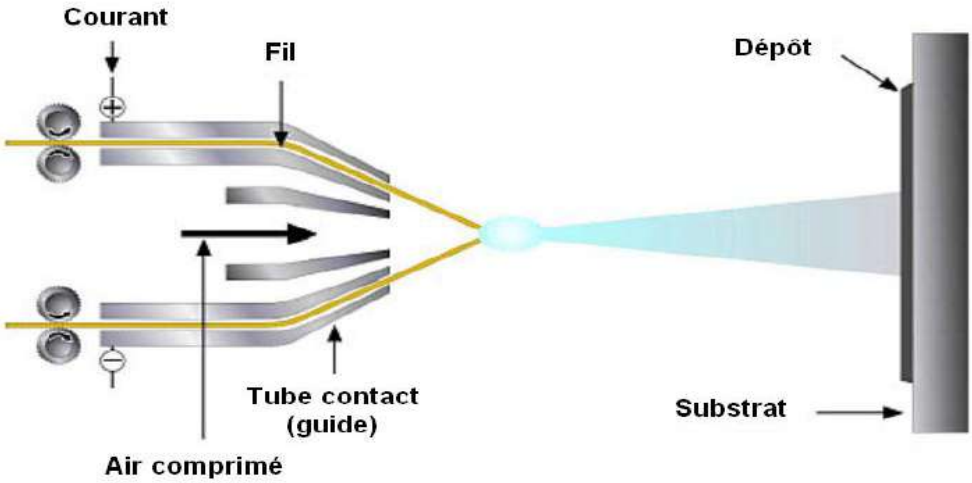


Figure I-5 : schéma du procédé arc fil

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

Où cette fois-ci le matériau à projeter se présente sous la forme d'une poudre pulvérulente constituée de particules de tailles généralement comprises entre 1*0* 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

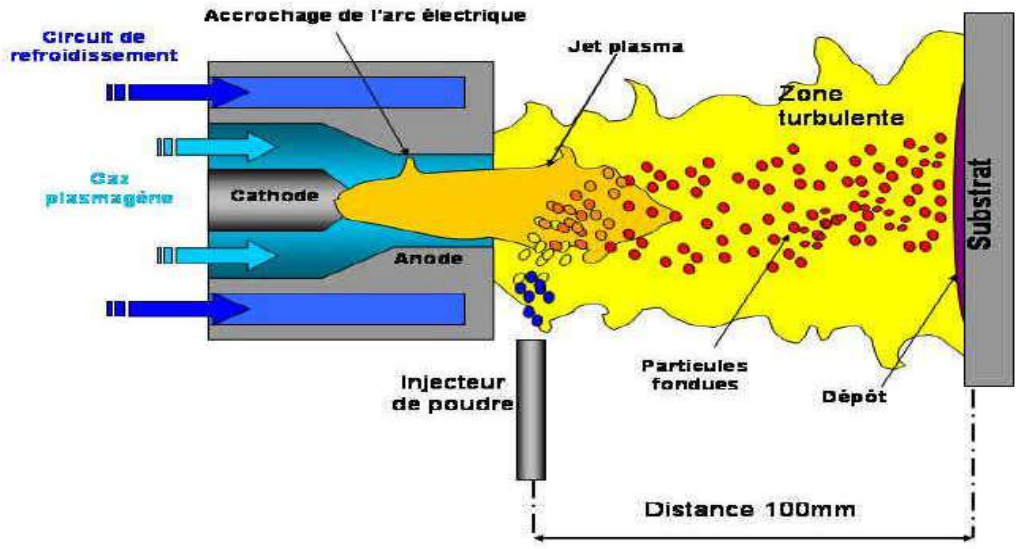


Figure I-6 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.

I.3. La projection plasma :

Ce procédé utilise des matériaux métalliques, céramiques ou cermets sous forme de poudre avec des particules de taille inférieure à 100 µm. Ces particules sont déposées dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. La source de chaleur est un jet de plasma produit par arc électrique ou une décharge radiofréquence. **[8]**

I.3.1. Fonctionnement de la torche à plasma d'arc :

Les torches conventionnelles employées en projection plasma sont constituées d'une cathode en forme de tige et d'une anode concentrique qui constitue la tuyère. Le gaz plasmagène circule dans l'espace entre ces deux éléments. Deux familles de torche sont à distinguer **[9]:**

- **Torche à arc transféré :**

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

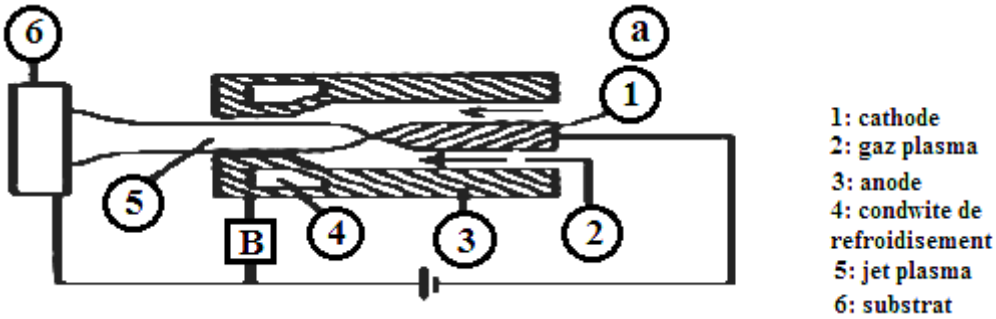


Figure I-7 : Torche plasma à arc transféré

- **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. **[10]**

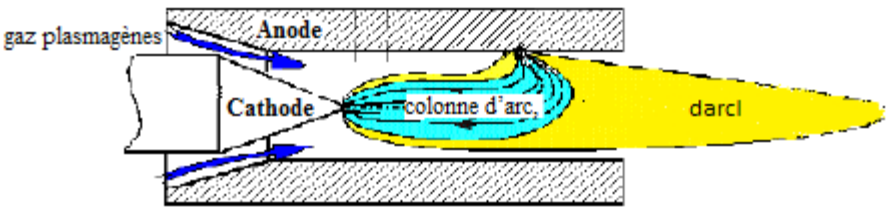


Figure I-8 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma.

I.3.1.1 Amorçage de l'arc :

Un plasma peut-être généré en faisant passer dans un gaz plasmagène un arc électrique entre l'extrémité conique d'une cathode en tungstène théorie (2% en thorine, ce qui abaisse le potentiel d'extraction du métal de 4,5 à 2,5eV) de type tige et le revêtement de tungstène de l'anode en cuivre. L'initiation du transport de charges entre les deux électrodes dans un gaz à température ambiante (considéré comme un bon diélectrique) nécessite l'application d'une surtension (6 à 10kV) sous une fréquence de quelques MHz qui doit être supérieure à Une valeur critique appelée tension de claquage pour rendre ce gaz conducteur. De l'argon est généralement utilisé pour cette étape d'amorçage de l'arc électrique, ce gaz monoatomique étant plus facile à ioniser que les autres gaz plasmagènes et la tension de démarrage plus faible, limitant ainsi le courant de démarrage. Le passage du courant s'effectue alors au travers du gaz ionisé. **[11]**

I.3.1.2 Le gaz plasmagène :

Le gaz plasmagène est généralement constitué de deux gaz, le premier est un gaz lourd qui donne sa quantité de mouvement aux particules injectées. Le choix est alors limité à l'argon (40 g/mole) ou à l'azote moléculaire (28 g/mole). Les torches utilisées (développée au laboratoire ou industrielle comme la PTF4 de Sulzer Metco) étant conçues pour travailler à l'argon comme gaz primaire nous ne considérerons que ce gaz. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent la tension « utile » qui va être disponible dans le jet de plasma est $\int_0^1 E(z).dz$ 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. **[12]**

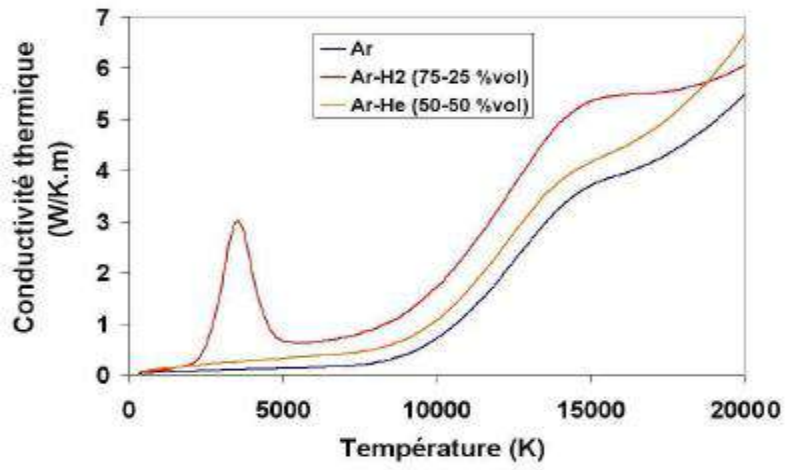


Figure I–9 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes. [12]

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.10) 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.

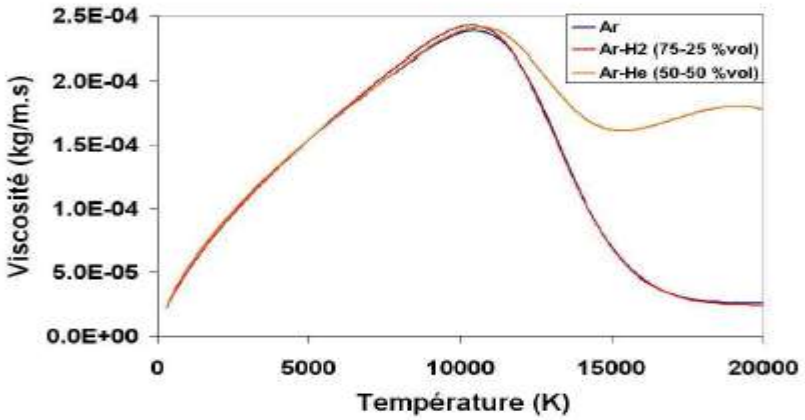


Figure I–10 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. [12]

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–11 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.

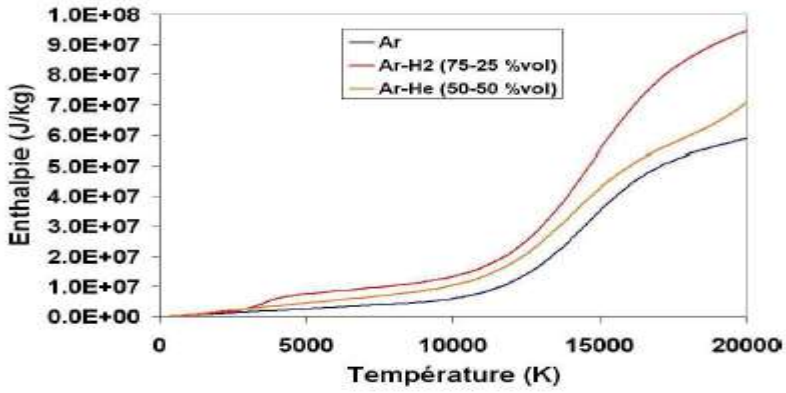


Figure I–11 : Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes. [12]

I.3.1.3. L'injection des gaz plasmagènes :

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

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

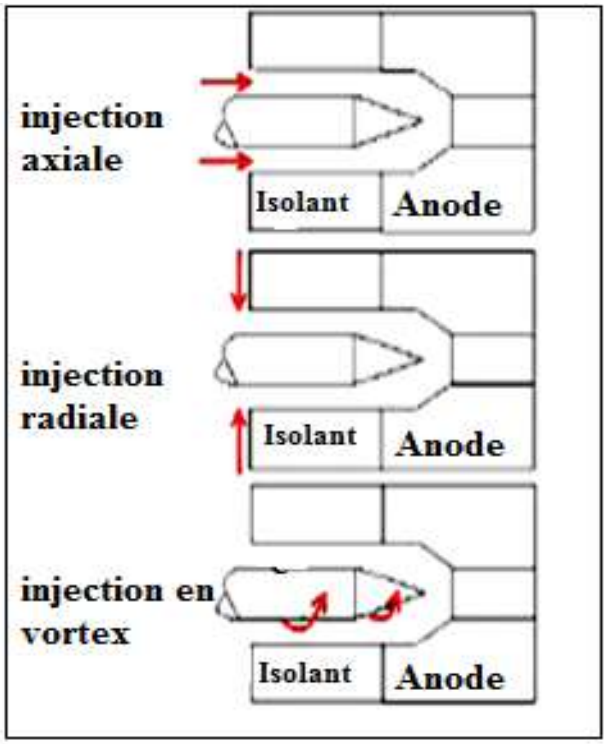


Figure I–12 : schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche de projection plasma

I.3.2. Formation du jet plasma :

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

- une température à cœur élevée : de 5000 à 14000 K avec une densité de flux thermique Pouvant atteindre 1010 W.m-2.
- une vitesse d'écoulement élevée : de 500 à 2500 m.s-1.
- des gradients radiaux importants : jusqu'à 5.105 (m.s-1).m-1 pour la vitesse et 107 K.m-1 Pour la température.
- un mélange gazeux de faible densité : 1/30 à 1/40 de la densité du mélange gazeux à froid. **[13]**.

I.3.3. Ecoulement du jet plasma :

La Figure I-13 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 10-3s et 10-4s, le jet est fluctuant, du fait des instabilités du pied d'arc. L'effet non Négligeable de ces fluctuations sur le traitement thermocinétique des particules a été étudié par

- Entre 10-1s et quelques secondes, le jet de plasma est globalement stable. C'est en général ce que L'on considère pour déterminer les transferts plasma-particules contrôlant la projection **[14]**.

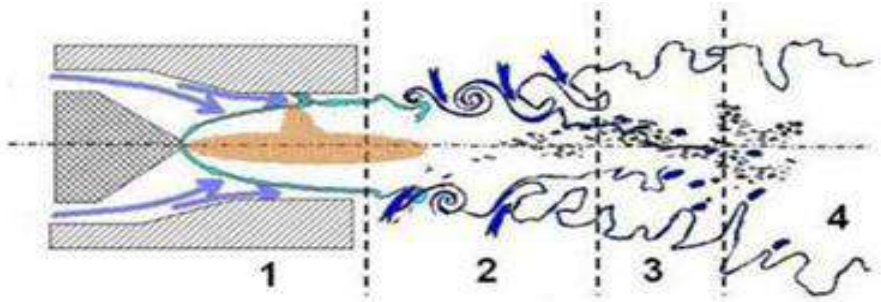


Figure I–13 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1 Ecoulement laminaire ,2 Début de développement de turbulence ,3 Ecoulement cisaillé turbulent, 4Ecoulement pleinement développé.

I.3.3.1. Modélisation de l'écoulement :

Connaissant le nombre de mach, on peut alors appliquer d'autres équations au cas spécifique de la zone de sortie de tuyère **[15] :**

I.3.3.1.1. Température de l'écoulement :

La théorie isentropique unidimensionnelle donne en sortie de tuyère :

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

$$\frac{T_0}{T_e} = 9.74 \; en \; hélium$$

Ici T est la température du gaz au point considéré de la tuyère, T'est la température du gaz En sortie de tuyère, T0 est la température d'introduction du gaz dans la tuyère.

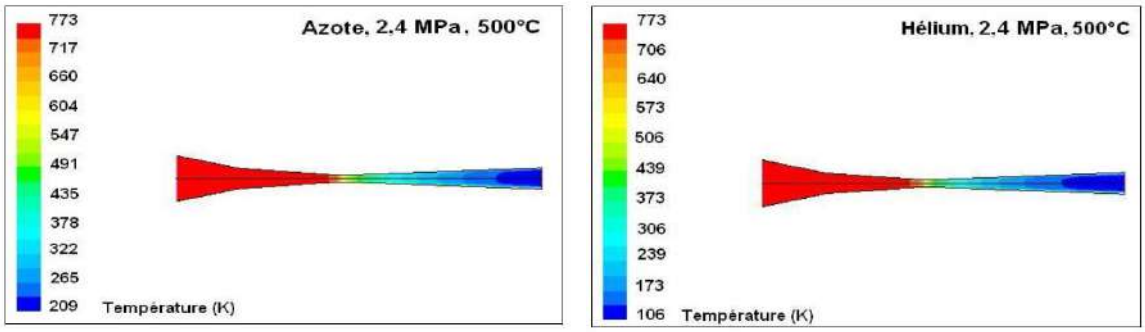


Figure I–14 : Évolution de la température dans la tuyère

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

I.3.3.1.2. Densité et pression de l'écoulement :

La théorie isentropique unidimensionnelle donne en sortie de tuyère :

$$\frac{\rho_0}{\rho_e} = 35.13 \; en \; azote \; et$$

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

Ici ρ est la densité du gaz au point considéré de la tuyère, ρ_e est la densité du gaz en sortie de tuyère, ρ_0 est la densité d'introduction du gaz dans la tuyère.

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

$$\frac{P_e}{P_t} = 0.013 \text{ en azote et}$$

$$\frac{P_e}{P_t} = 0.007 \text{ en Hélium}$$

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

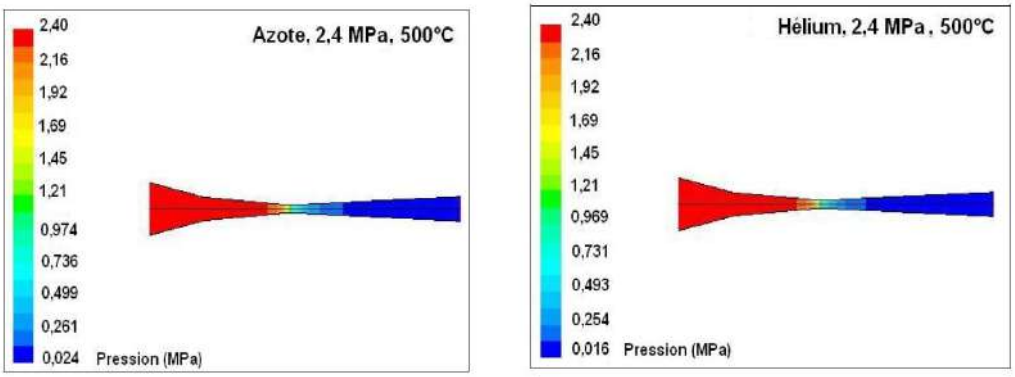


Figure I–15 : Évolution de la pression dans la tuyère

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

I.3.3.1.3. Vitesse de l'écoulement :

L'application de la théorie isentropique unidimensionnelle donne :

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

u_g=39.72$\sqrt{T_0}$ avec l'hélium.

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

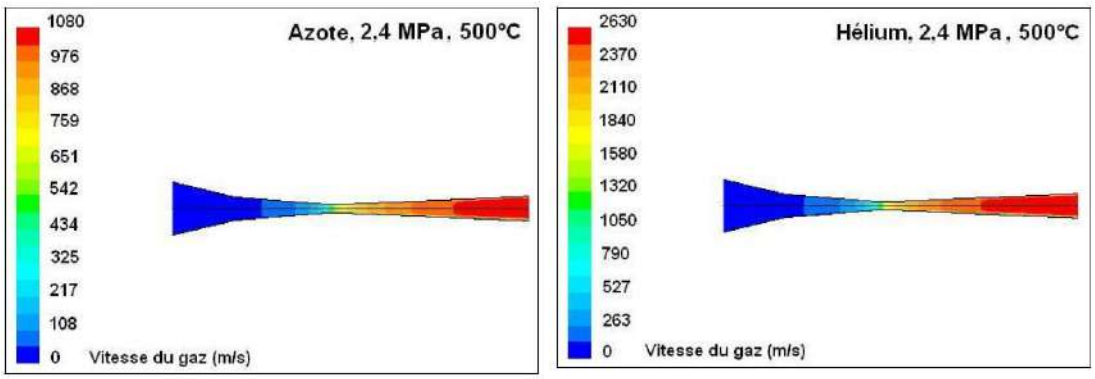


Figure I–16 : Iso contours de la vitesse du gaz (azote et hélium) dans la tuyère

I.3.4. 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, …) **[16]**.

I.3.4.1 Injection de la poudre :

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

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

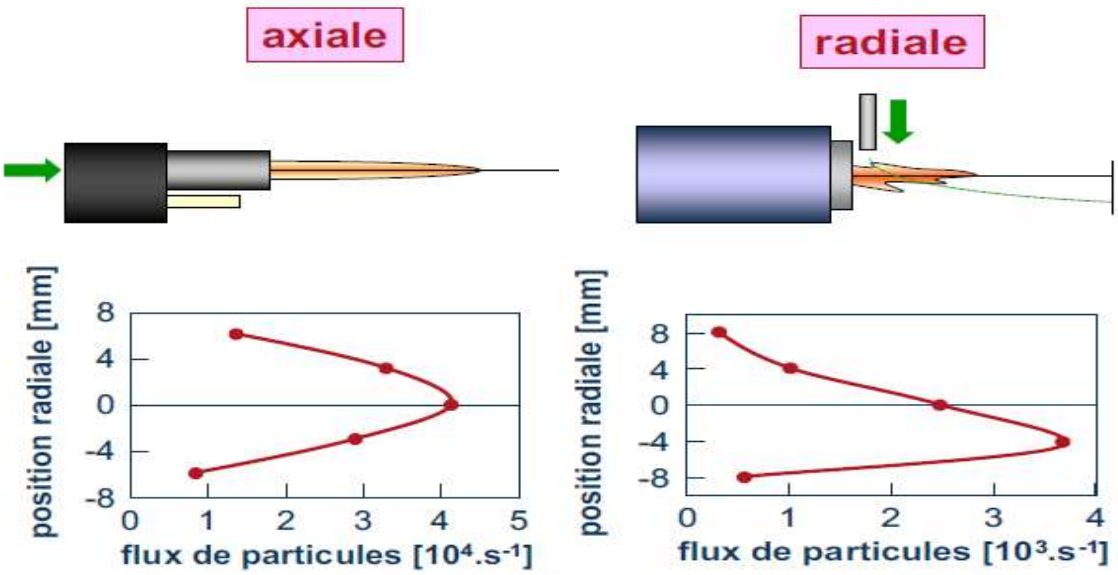


Figure I–17 : schéma de l'injection de la poudre (axial, radiale)

I.3.4.2 Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement plasma-particules :

La couche limite qui se développe autour de la particule se caractérise par un gradient important de température, la différence de température entre le gaz et la surface de la particule peut atteindre 104 K, ce qui se traduit par des phénomènes de diffusion dans la couche limite et implique un écart à l'équilibre chimique fonction de l'ordre de grandeur des vitesses des réactions chimiques et de la vitesse de diffusion **[16]**.

I.3.4.2.1 Transfert de quantité de chaleur :

C'est le transfert thermique qui permet au plasma de chauffer et de fondre les particules en vol. Différents mécanismes influencent ce transfert thermique :

- le gradient de température à l'intérieur de la couche limite thermique
- l'évaporation du matériau
- la conduction de chaleur à l'intérieur de la particule
- l'effet de raréfaction dans le cas de petites particules
- la forme et l'état de surface de la particule

Différentes études ont montré que le chauffage par conduction-convection dans la couche limite thermique, duquel on soustrait les pertes radiatives des particules vers l'environnement extérieur, était le mécanisme prépondérant. Il dépend donc essentiellement de la température locale du jet de plasma et de sa conductivité thermique **[17]**.

$$\mathbf{Q} = h.\pi.d_p^2(T_\infty - T_s) - \pi.\, d_p^2.\varepsilon.\sigma_s.\,(T_s^4 - T_a^4) \qquad \textbf{(I -1)}$$

Avec : h le coefficient de transfert thermique (W.m-2.K-1)
T_∞ La température du plasma (K)
T_S La température de la particule (K)
T_a La température ambiante (K)
E l'émissivité de la particule (-)
d_p Le diamètre de la particule (m)
σ_s La constante de Stephan-Boltzmann (W.m-2.K-3)

Ceci a donné lieu à de nombreuses corrélations qui amènent à considérer principalement le transfert conductif donné par l'équation I.20, par exemple en considérant une conductivité moyenne intégrée comme. Le choix de la conductivité thermique moyenne intégrée pour le plasma se justifie du fait des gradients thermiques considérables existants au niveau de la couche limite de la particule, ce qui rend délicat le calcul des propriétés thermiques du plasma au voisinage de cette dernière **[17].**

$$\overline{\boldsymbol{K}} = \frac{1}{T_p - T_s}\int_{T_s}^{T_p} K(s).\, ds \qquad \textbf{(I-2)}$$

Avec : $\overline{K}$ La conductivité moyenne intégrée (W. $m^{-1}.K^{-1}$)
T_S La température de surface de la particule (K^{-1})
T_p La température du plasma loin de la particule (K^{-1})

Le flux thermique convecto - conductif est décrit par le nombre de Nusselt par le biais de l'équation:

$$\mathbf{N_u} = 2+0.66R_e^{0.5}.P_r^{0.33} = \frac{\mathbf{h.d_p}}{\overline{\mathbf{K}}} \qquad \textbf{(I-3)}$$

Avec : Nu le nombre de Nusselt (-)
R_e < 200
P_r Le nombre adimensionnel de Prandtl (de l'ordre de 0,5 à1)

OÙ $$\mathbf{P_r} = \frac{\mu.C_p}{\overline{K}} \qquad \textbf{(I-4)}$$

Avec : μ la viscosité du plasma (kg. $m^{-1}.S^{-1}$)
C_p La chaleur spécifique (J.k$Kg^{-1}.K^{-1}$)
$\overline{K}$ La conductivité moyenne intégrée (W. $m^{-1}.K^{-1}$)

Lorsque R_e tend vers 0, la vitesse des particules est quasiment égale à celle du plasma et N_u =2.
Le régime est, alors, un régime de conduction pure. Les phénomènes de propagation de la chaleur dans la particule sont à prendre en considération, dès que le nombre de Biot ($\mathbf{B_i}$) est supérieur à 0,03. Ceci est le cas avec de la zircone, matériau céramique réfractaire, dans un plasma Ar-H2 quand celui-ci contient plus de10% en volume d'H2. Le nombre de Biot correspond au rapport de la conductivité thermique moyenne intégrée du plasma $\overline{K}$ sur la conductivité thermique du matériau K_p . La propagation de la chaleur est d'autant plus facile que $B_i$est grand.

$$\mathbf{B_i} = \frac{d_p.R}{k_{th}} = \frac{\overline{K}}{K_p} \qquad \textbf{(I-5)}$$

Avec : h Le coefficient d'échange thermique particule/plasma (W. $m^{-2}.K^{-1}$),
d_p Le diamètre de la particule (m),
k_{th} La conductivité thermique (W$m^{-1}.K^{-1}$),
$\overline{K}$ La conductivité moyenne intégrée (W. $m^{-1}.K^{-1}$),
K_p La conductivité thermique du matériau (W. $m^{-1}.K^{-1}$)
La température de la particule est uniforme lorsque K_p >> κ et donc B_i< 0,01.

Lorsque B_i est supérieur à 0,01, il existe alors une différence de température entre le cœur de la particule et sa surface. Pour un matériau avec un Kp élevé, l'équation de la chaleur devient **[17]**:

$$h.\pi.d_p^2(T_\infty - T_s) = \frac{1}{6}\pi.\rho_p.C_p\ d_p^3\ \frac{d.T_p}{dt} \qquad \textbf{(I-6)}$$

Où : le terme de gauche est la chaleur transférée par le plasma et celui de droite la chaleur absorbée par la particule.

Il faut également tenir compte de l'effet Knudsen et d'évaporation de la particule qui peuvent réduire très sensiblement le transfert thermique entre le plasma et celle-ci suivant sa taille. De plus, les petites particules qui possèdent une inertie dynamique moins forte que celle des grosses particules, se retrouvent dispersées dans le jet du fait des turbulences. Elles subissent des phénomènes de surfusion et vaporisation pour celles qui passent au cœur du jet. Les nuages de vapeur autour des particules lors de leur vaporisation affectent le taux de transfert de chaleur entre plasma et particules (phénomène important pour les matériaux Réfractaires tels que la zircone).

Ces modèles montrent la nécessité de choisir le gaz plasmagène pour obtenir le transfert de chaleur recherché, en trouvant un compromis tant sur la vitesse de l'écoulement (qui joue sur le temps de séjour des particules) que sur le coefficient de transfert thermique (qui augmente quand le pourcentage en hydrogène est plus élevé). Enfin, il faut tenir compte de la distribution en taille des particules pour avoir une idée de leur distribution de vitesses et de leur traitement thermique **[18].**

I.3.4.2.2 Transfert de quantité de mouvement :

La vitesse atteinte par les particules dépend de la vitesse du jet de plasma, mais aussi de sa viscosité par le biais du coefficient de traînée (plus le plasma est visqueux, plus les particules approchent de la vitesse du gaz). Cependant, il est nécessaire de tenir compte de l'effet de raréfaction ou effet Knudsen et de l'évaporation de la particule qui peuvent réduire très sensiblement le transfert de quantité de mouvement plasma–particules selon la taille des particules (dans un plasma thermique, le libre parcours moyen est de l'ordre du µm et, pour les petites particules de diamètre inférieur à 20µm, l'hypothèse du régime continu est caduque et il est alors nécessaire d'introduire un coefficient correctif au coefficient de traînée surestimé dans l'approximation des milieux continus) L'accélération des particules est régie par différentes forces qui sont entre autres :

- la force de traînée (qui est très prépondérante devant toutes les autres dans ce cas-ci)
- la force d'inertie
- la force de gravité
- la force due au gradient de pression.

L'accélération des particules, découlent de la solution de Stockes pour un écoulement autour d'une sphère, est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\frac{1}{6}\pi.\rho_p.d_p^3\frac{d_v}{dt} = \frac{1}{8}C_D.\pi.d_p^2.\rho_g\left(U-U_p\right)^2 \quad \textbf{(I-7)}$$

Avec : C_D le coefficient de traînée (-)
d_p Le diamètre des particules (m)
ρ_p La masse volumique de la particule (kg. m^{-3})
ρ_g La masse volumique du gaz (kg. m^{-3})
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})

$$\text{Où :} \quad \mathbf{C_D} = \frac{\frac{F_D}{A}}{\frac{1}{2}\rho_g.V_r^2} \quad \textbf{(I-8)}$$

Avec : F_D La force de traînée exercée par le fluide sur la particule (N)
A l'aire de la particule perpendiculaire à l'écoulement (m^2)
v_r La vitesse relative fluide/particule (m. s^{-1})
ρ_p La masse volumique du gaz (kg.m-3)

$$\text{Où :} \quad \mathbf{U_R} = \sqrt{(U-U_p)^2+(V-V_p)^2} \quad \textbf{(I-9)}$$

Avec : 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})
V La composante radiale de la vitesse du gaz (m/s)
V_p La composante radiale de la vitesse de la particule (m/s)
$\mathbf{U_R}$ Permet également de définir le nombre de Reynolds des particules

$$\mathbf{U_R} = \frac{\rho.d_p.U_R}{\mu} \quad \textbf{(I-10)}$$

Avec : μ est la viscosité du fluide (kg. m. s^{-1})
P La masse volumique du fluide (kg. m^{-3})
d_p Le diamètre de la particule (m)
U_R La vitesse relative fluide/particule (m. s^{-1})

Ceci implique que CD dépend du nombre de Reynolds (nombre adimensionnel). L'effet de raréfaction ou effet Knudsen réduit le transfert de quantité de mouvement :

$$\boldsymbol{K_n} = \frac{\lambda}{d_p} \quad \textbf{(I-11)}$$

Avec : K_n Le nombre de Knudsen
d_p Le diamètre de la particule (m)
λ Le libre parcours moyen (m)

Si $0{,}01 \leq K_n \leq 1$ le milieu n'est plus considéré comme continu et un terme correctif Doit être introduit dans C_D , on a alors :

$$\mathbf{C_D} = C_D \cdot \gamma^{0.45} \qquad \textbf{(I-12)}$$

Avec : γ le terme correctif.
En général, quand K_n augmente de 0,01 à 1, γ augmente de 1 à 4.

I.4. Comportement de particules:

L'état de fusion des particules à l'impact dépend de leur mode de fabrication et leur traitement dans le jet de plasma. Pour des poudres agglomérées frittées, les particules Peuvent être, après projection, complètement fondues, fondues avec une poche de gaz à Cœur, fondues en surface et conserver leur structure agglomérée à cœur ou in fondues.

DIEZ et al [1993] ont proposé différents mécanismes d'étalement de particules agglomérées frittées d'yttrine (Figure I-17) après examen microstructural des dépôts obtenus. Pour une particule fondue à cœur creux, si son pourtour reste liquide avant étalement, le gaz piégé s'en échappe à l'impact et les lamelles obtenues sont denses (cas 1). Si, à l'inverse, la particule est suffisamment refroidie dans l'air ambiant pour qu'une pellicule solide se forme, son comportement à l'impact est totalement différent (cas 2-3-4) et dépend essentiellement de l'épaisseur de la pellicule solide : plus cette dernière est épaisse et moins la particule s'étale. Il y a alors création de porosité au sein des dépôts. Si les particules sont totalement resolidifiées avant impact (cas 4), elles peuvent soit rebondir et ne pas participer à la formation du dépôt soit être piégées dans le dépôt. Pour une particule partiellement fondue, en absence de refroidissement de la surface liquide (cas 5), la particule s'étale pour former une lamelle avec à cœur un noyau solide conservant la structure agglomérée de la poudre initiale qui peut éclater à l'impact suivant la solidité des Agglomérats. Pour une particule partiellement fondue et resolidifiées (cas 6-7), son mode de déformation à l'impact dépend des épaisseurs relatives de la pellicule solide et de la couche liquide intermédiaire **[19]**.

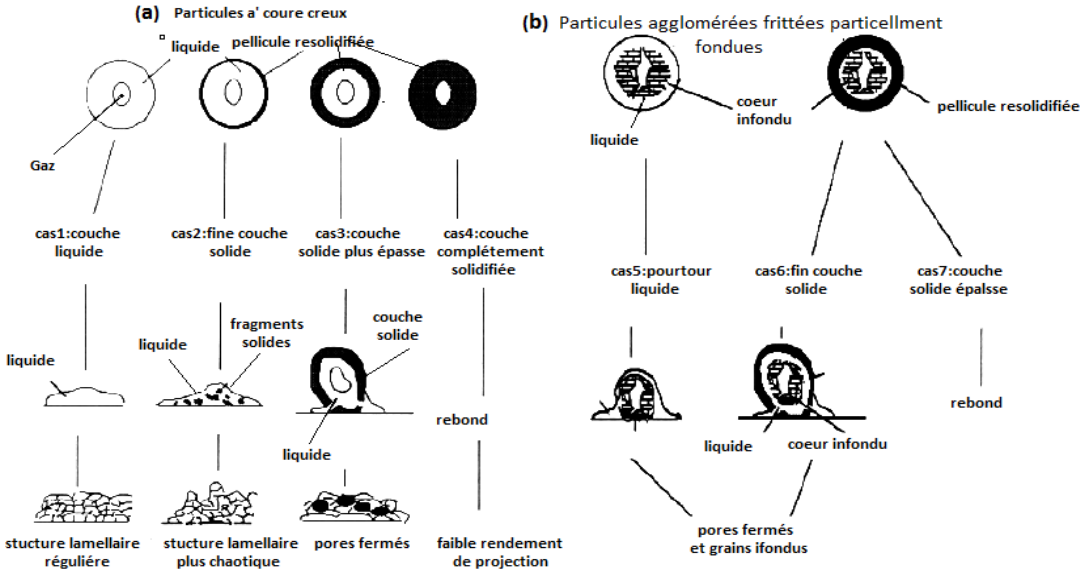


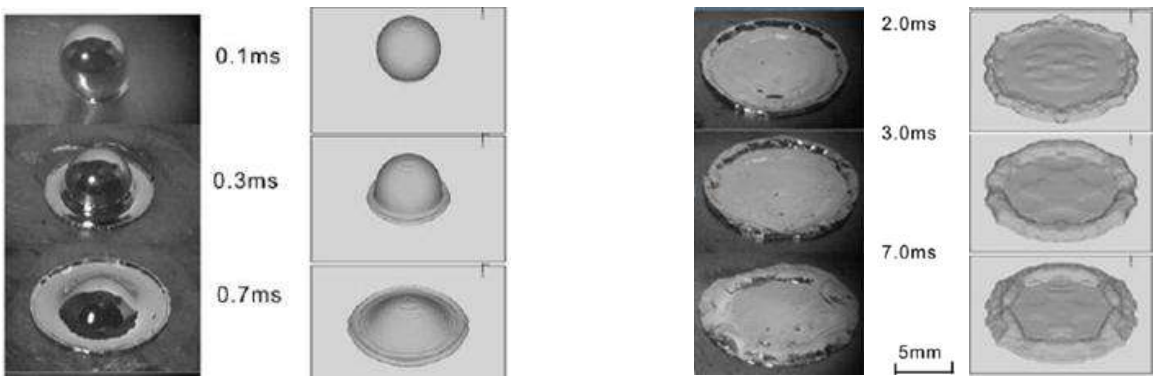
Figure I-18 : Comportement de particules agglomérées frittées : (a) fondues à cœur creux, (b) Partiellement fondues à l'impact sur le substrat [19]

I.5. Ecrasement des particules sur le substrat :

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme Lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule. L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de Surface à la fin de l'écrasement. L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes: impact initial, étalement de la particule et enfin refroidissement et solidification.

✓ **l'impact :**

A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse, il a été observé pour des particules d'alumine que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) se passe toujours si leur nombre de Sommerfeld K (Tableau 1–1) est supérieur à 70 et parfois quand 10<K<70. Cet éclaboussement croît en fonction de K et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3 mm, c'est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène **[20]**.



(a) Expriment (b) simulation (a) Expriment (b) simulation

Figure I–19 : Figure Influence de vitesse des particules d'alumine projetées par Plasma avant impact sur la morphologie des lamelles [21]

✓ **l'étalement :**

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

$$\frac{3.\varepsilon^2.m}{W_e} + \frac{1}{R_e}\left(\frac{\varepsilon_m}{1.2941}\right)^5 = 1 \qquad \textbf{(I-13)}$$

Cette formule peut être simplifiée, pour un nombre de Reynolds Re > 100, et un nombre de Weber

We > 1000 et se réduit alors à :

$$\boldsymbol{\varepsilon_m} = 1.2941\ R_e{}^{0.2} \qquad \textbf{(I-14)}$$

Où $\boldsymbol{\varepsilon_m}$ est le degré d'étalement maximum

I.6. La solidification des lamelles :

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle-substrat varie

Avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène **[22].**

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

Tableau 1-1 : Rappel de quelques nombres caractéristiques de l'écoulement plasma et des spats (sans dimension) [21]

I.7. Formation des dépôts :

En projection thermique, les dépôts sont formés par empilement successif de lamelles individuelles écrasées sur un substrat solide ou sur des lamelles déjà solidifiées et dont l'épaisseur varie de 0,8 à 4 µm. La microstructure des dépôts ainsi réalisés et donc leur propriété dépendent essentiellement des mécanismes d'étalement de la matière fondue sur le substrat, de sa cinétique de refroidissement et de solidification et du contact des lamelles avec le substrat et entre elles. Il faut remarquer que les applications industrielles exigent généralement une bonne adhérence du dépôt au substrat ainsi qu'une bonne cohésion (adhérence entre les lamelles déposées). Ces deux caractéristiques comme les propriétés Thermomécaniques et électriques sont liées à la qualité de contact entre les différentes lamelles empilées et à l'architecture du dépôt.

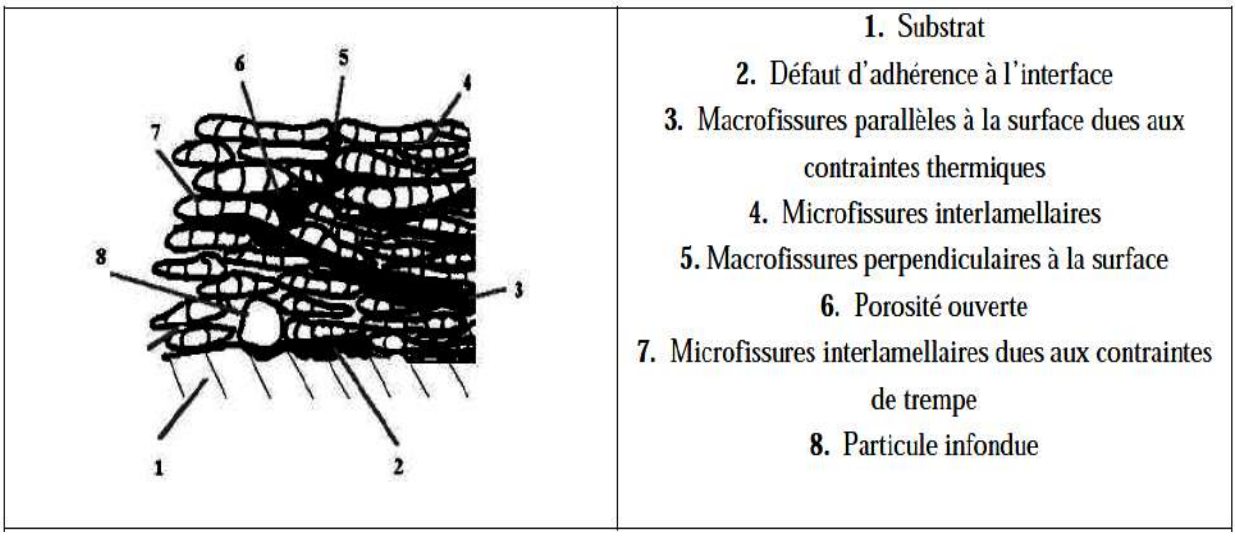


Figure I-20 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma [23]

I.8.d Évolution de la température dans la lamelle et le substrat [24]:

L'histoire thermique de chaque particule, de la lamelle formée et des lamelles empilées peut être caractérisée par plusieurs temps :

- le temps T_f correspondant à l'étalement de la particule
- le temps T_{f_t} pour lequel l'étalement est quasiment complet
- le temps T_n pour lequel la nucléation se déclenche, A ces temps caractéristiques s'ajoutent
- T_s : temps entre deux lamelles successives,il dépend du nombre de lamelles qui forment la
- passe et il est lié à la vitesse relative torche/substrat,
- T_1 : temps nécessaire pour déposer un nombre de lamelles successives formant l'épaisseur
- de la passe
- T_t : temps pour lequel la torche revient à la même position, il dépend de la vitesse de
- translation de la torche et de la vitesse de rotation du substrat.

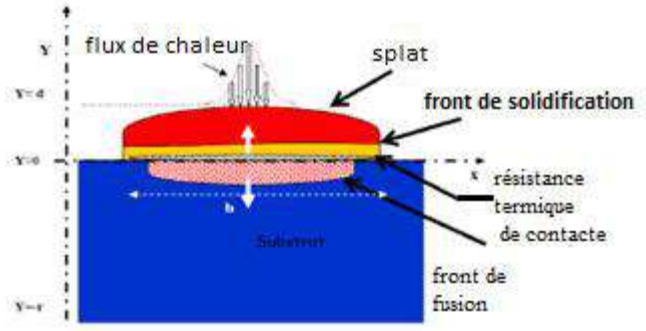


Figure I-21 : schéma de transfert de chaleur entre le splat et le substrat pendant la congélation

1.8.1 À Oxydation des substrats :

Les études montrent que le préchauffage des substrats améliore l'étalement des particules et l'adhésion des dépôts. Lorsque le préchauffage des substrats est obtenu en utilisant le jet plasma, la transmission thermique se fait principalement par convection et conduction (le rayonnement du plasma étant négligeable). A l'aide de mesures par diffraction Rayleigh au voisinage du substrat, le coefficient de transfert thermique entre le jet plasma et le substrat a été calculé : sa valeur est comprise entre 200 et 1200 W.m-2.K-1.

Le préchauffage des substrats métalliques par le jet plasma sous atmosphère ambiante peut provoquer l'oxydation de leur surface, influençant les propriétés des dépôts, essentiellement l'adhésion sur les substrats. Il a été montré que les espèces oxydantes dans le jet ainsi que celle de l'atmosphère autour du substrat favorisent l'oxydation de surface. Les caractéristiques de la couche d'oxyde sont liées à la nature du substrat, à son environnement, ainsi qu'à la vitesse, à la température et au temps de préchauffage **[24,25]**.

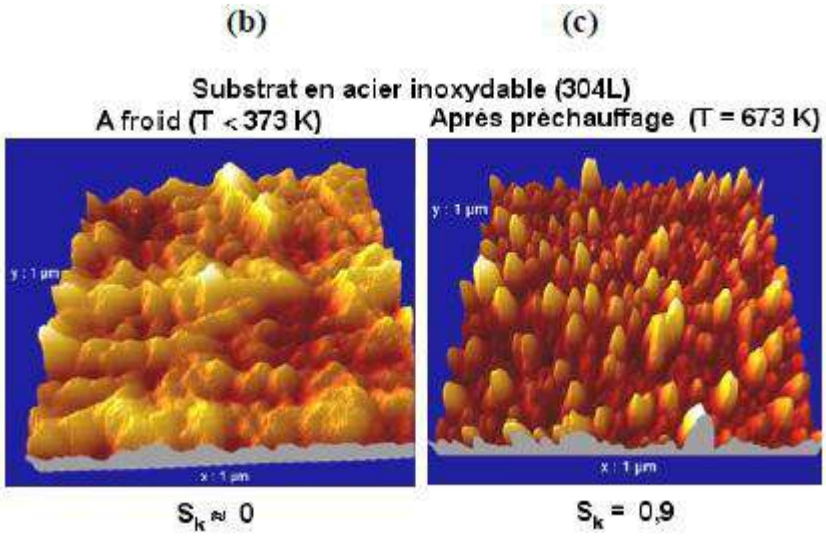


Figure I-22 :(a) Valeurs de S_k pour différentes topographies de surface. (b,c) Evolution de la topographie de surface d'un substrat en acier inoxydable (304L) avant (b) puis après (c) préchauffage (images obtenues par microscopie à force atomique) [CEDELLE et al, 2006].

I.9. Conclusion :

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

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

II.1. 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.2. Modèle dynamique :

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

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

La formulation mathématique des lois de la conservation régissant les phénomènes physiques comme les écoulements de fluides, est généralement écrite sous forme d'équations aux dérivées partielles comme suit **[26]** :

II.2.1. Equation de continuité :

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

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

Ou dans une notation plus compacte

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

II.2.2. Equation de quantité de mouvement :

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

Suivant OX :

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\right)+(\rho-\rho_0)g_x \quad \text{(II.5)}$$

Suivant OY :

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}\right)+(\rho-\rho_0)g_y \quad \text{(II.6)}$$

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

$$\mu=\tau_{xy}=\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right]\right. \quad \text{(II.7)}$$

$$\tau_{xx}=\mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right]$$

$$\tau_{yy}=\mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right] \quad \text{(II.8)}$$

II.2.3. Equation de conservation d'énergie :

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

$$\rho C_p\frac{DT}{Dt}+\rho C_p U.\nabla T=div(\lambda gradT)+\emptyset \quad \text{(II.9)}$$

Ou :

$$\emptyset=\tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y}+\tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{(II.10)}$$

Avec :

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

$\rho C_p U.\nabla \mathrm{T}$: La variation d'énergie par convection,

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

$\emptyset$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

II.3.modèle thermique :

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

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

II.3.1.Transfert de chaleur avec changement de phase :

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) **[27].** C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan **[28].** En général ces méthodes cherchent à approcher la position du front de solidification/fusion au cours du temps, et se divisent alors en deux catégories principales :

Les méthodes a grille mobile ou déformable : aussi appelées méthodes de suivi de front (front tracking).

Les méthodes a grille spatiale fixe/ qui regroupent par exemple la méthode de la chaleur spécifique équivalente, la méthode de la source de chaleur fictive et la méthode d'enthalpie.

II.3.1.1.Méthode a grille mobile :

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante **[29]**.

Dans le domaine occupé par la phase liquide

$$\rho_l c_{pl} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\lambda_l \nabla T) = 0 \qquad \text{(II.11)}$$

Dans le domaine occupé par la phase solide s

$$\rho_s c_{PS} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\lambda_s \nabla T) = 0 \qquad \text{(II.12)}$$

A l'interface liquide-solideΓ(x, t)

$$\rho l_f \vartheta_n = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \qquad \text{(II.13)}$$

Dans les équations ci- dessus

n : représente la normale à l'interface Γ(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 a ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier **[28].**

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

II.3.1.2.Méthode a grille fixe :

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

II.3.1.3.Méthode d'enthalpie :

La méthode d'enthalpie a maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide .Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et Al. Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisées jusqu'à aujourd'hui **[30].**

L'équation d'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 (fig.-II.1) elle inclut la chaleur latente par unité de masse L_f etest definiecommesuit :

$$H(T)=\int_{Tref}^{T} T(dT) + f_l L_l \qquad (II.14)$$

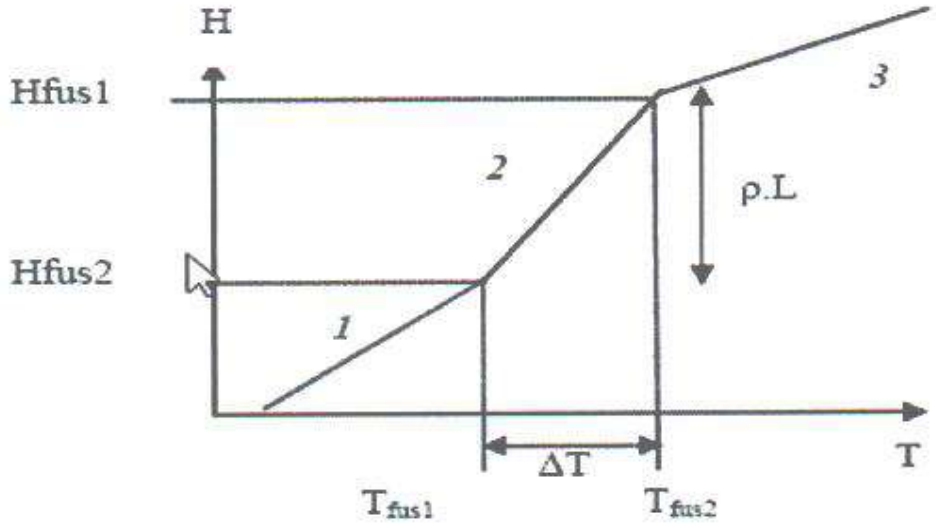


Figure II.1: évolution de l'enthalpie en fonction de la température [31].

La conservation de l'énergie s'exprime alors **[31].**

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla.(\rho H v) = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \text{(II.15)}$$

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

$$\frac{\rho \partial(H)}{\partial t} + \rho v\,.\nabla.H = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \text{(II.16)}$$

Et on fonction de la température

$$\rho c_p \frac{\partial(T)}{\partial t} + \rho c_p v.\nabla.T = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q + \rho l_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad \text{(II.17)}$$

II.3.1.4.Méthode de la chaleur spécifique équivalente :

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique $\boldsymbol{c_p}$**[31].**ainsi, si le chemin de solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente :

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

La chaleur spécifique équivalentec_p^{eq} est ainsi définie :

$$\rho c_p^{eq} = \rho c_p - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad \text{(II.19)}$$

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

$$\rho c_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \text{(II.20)}$$

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

II.3.2.Modèle thermique utilisé :

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

$$\rho c_p^{eq} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (u.\nabla)T\right) = \nabla.(\lambda \nabla T) + Q \quad \text{(II.21)}$$

II.3.3.Grandes méthodes des discrétisation :

Pour passer d'un problème exact continu régit par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles des méthodes, **[32]** :

- ✓ La méthode des différences finies (MDF) procédé par approximation des dérivées d'une fonction en termes de ces valeurs approchées aux nœuds du maillage.
- ✓ La méthode des volumes finis
- ✓ La méthode des éléments finis

II.3.3.1. La méthode des différences finies :

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeur ponctuelles la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. Plus clairement nous avons dit:

Elle consiste à approximer les dérivées de l'EDP par des troncatures de séries deTaylor.

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

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

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

II.3.3.2.La méthode des éléments finis :

La méthode consiste à approcher, dans un sou -espace de dimension finie, un problème écrit sous la forme variationnelle dans un espace de dimension infinie. Cette forme variationnelle est équivalente à une forme de minimisation de l'énergie en générale. La solution approchée dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeur en certain points ou nœuds du maillage.

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux problèmes d'équilibre. Elle permit de traiter des géométries complexes contrairement aux différences finies mais demande un grand coût de temps de calcul et de mémoire.

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**,**

II.3.3.3. La méthode des volumes finis :

La méthode **VOF**, particulièrement adaptée pour simuler les écoulements à interfaces fortement déformées, consiste à définir à chaque instant la position de la surface libre de l'écoulement. On utilise pour cela une fonction discrète qui représente dans chaque cellule la fraction volumique du métal liquide par rapport au volume total de la cellule. Les cellules liquides et gazeuses (air) sont définies respectivement par $C_k = 1$ et $C_k = 0$, et l'interface liquide-air est représentée dans une cellule mixte par une valeur de C_k comprise strictement entre **0 et 1** (voir Fig**.** II.1).

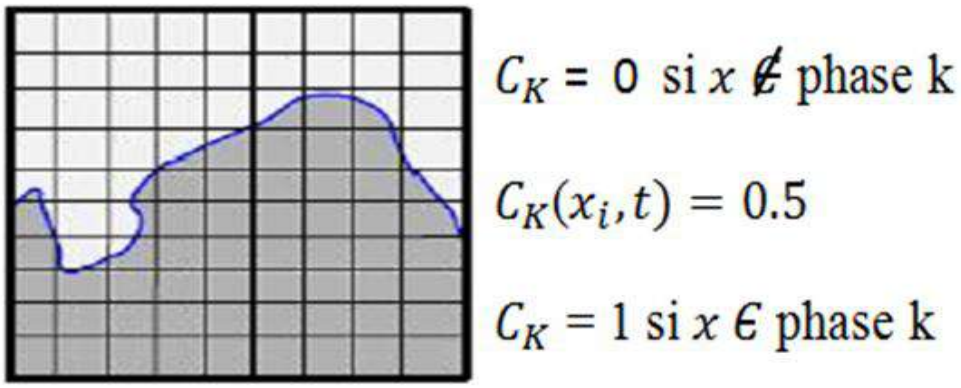
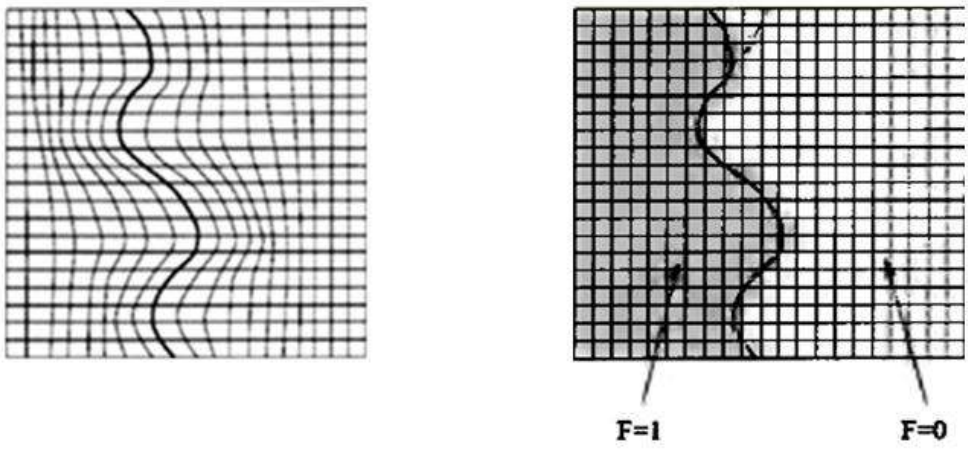


Fig. II.2: La méthode VOF

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 et la Méthode Eulérienne (**Maillage fixe) [33]**.



Méthode lagrangienne Méthode Eulérienne (Maillage Mobile) (Maillage fixe)

Fig.II.3: La méthode lagrangienne et la méthode eulérienne

II.4.1.les méthodes lagrangiennes :

Les méthodes lagrangiennes, sur maillage mobile permettent de représenter l'interface comme une réelle discontinuité et de suivre son évolution de manière très précise. Le transport de l'interface s'effectue soit en déformant le maillage au cours du calcule soit en régénérant le maillage après avoir advecté l'interface. Le principal avantage de cette méthode est de suivi très précis de l'interface qui permet d'imposer très facilement et avec rigueur les conditions aux limites de l'interface. Ces méthodes sont limitées aux écoulements ou l'interface ne subit pas de grandes déformations, car cela conduit a des maillages trop déformés.

II.4.2.les méthodes eulérienne :

Les méthodes eulériennes sont en général utilisées sur un maillage fixe. 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 peut 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 différente méthode pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

c) Méthode de ligne de niveau (level set)

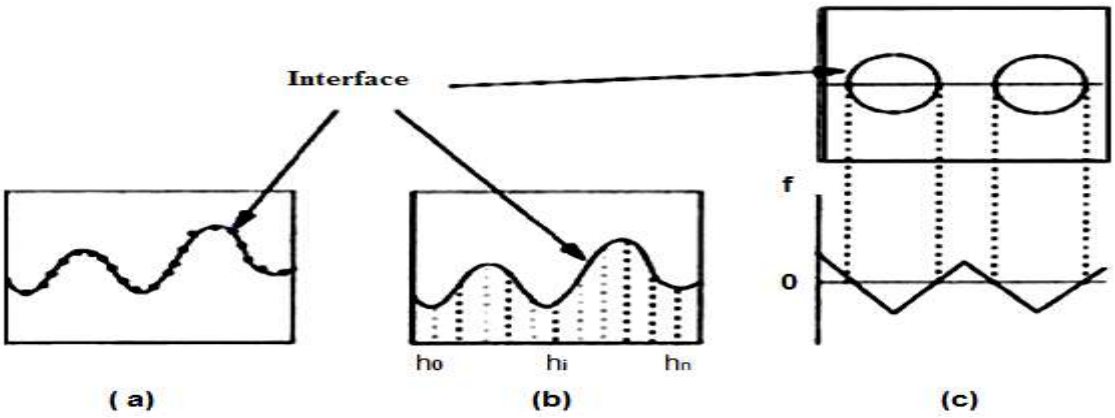


Fig. II.4: **Différentes méthodes de suivi de front [33].**

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

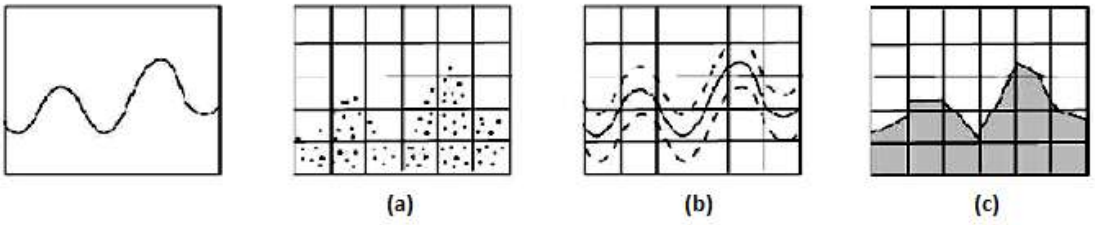


Fig. II.5: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque

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

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluide) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide **[34].**

II.4.3. La Méthode VOF CIAM :

Nous utilisons la méthode VOF CIAM qui est une méthode de Construction de l'interface affine par morceaux. VOF CIAM se décompose en trois parties : on doit tout d'abord reconstruire la représentation de la surface libre à partir de la fraction volumique ensuite on transporte l'interface a l'aide d'une méthode lagrangienne et enfin on calcule le nouveau champ de fraction volumique. L'interface est alors approchée par un segment en 2D comme on peut le voir sur la figure (II.6). La force de la méthode VOF CIAM est la reconstruction de l'interface qui se fait-on fonction de son orientation et de la fraction volumique. Ainsi ; par rapport à des méthodes qui utilisent des schémas de discrétisation (schémas UPWIND, QUICK, TVD..), on élimine totalement le phénomène de diffusion numérique, et par rapport à d'autre méthodes VOF (VOF SLIC) on suit l'interface de façon plus précise.

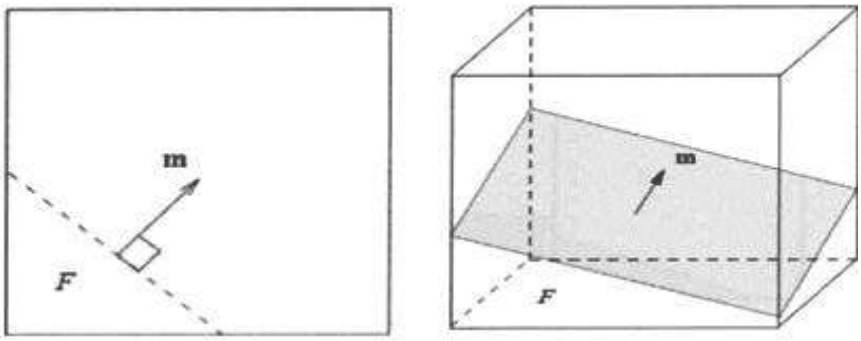


Fig. II.6: Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique

II.5.Conclusion :

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

III.1.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.2. Méthodes de discrétisation :

- Méthode des différences finies.
- Méthode des volumes finis
- Méthode des éléments finis

III.2.1 Présentation de la méthode :

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

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

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

Schématiquement Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis peuvent illustrer à la figure suivante **:**

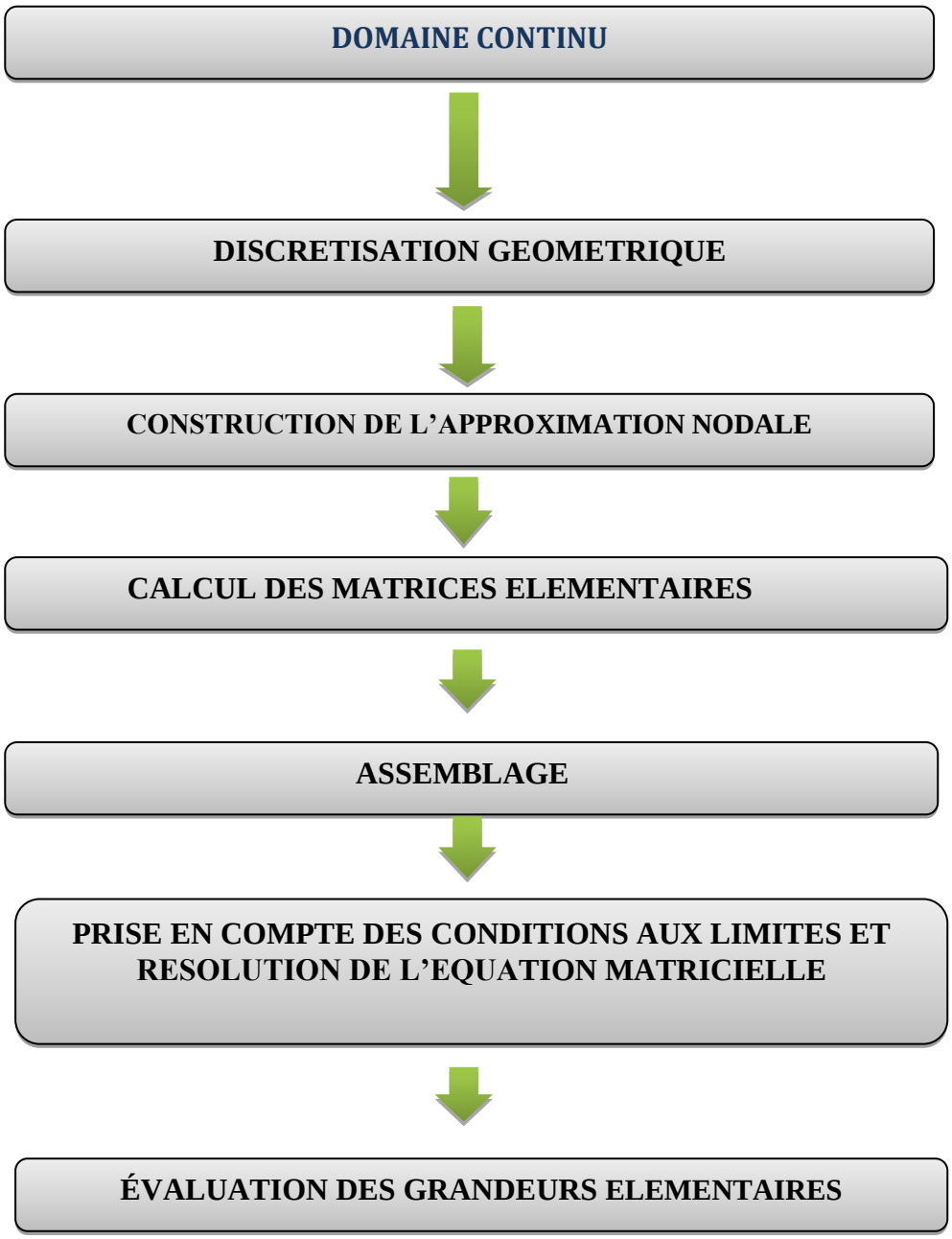


Figure.III.1 : **Démarche éléments finis**

III.3.Forme générale des équations du système [35]:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\emptyset}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_X c_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_y c_{\emptyset}\emptyset\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial x}{\partial y}\right) + S_{\emptyset} \qquad \text{(III.1)}$$

$\emptyset$: Variable généralisée

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

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

$S_{\emptyset}$: Termes source.

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

Tableau III.1 : Tableau de Représentation d'équation de transport. [35]

III.4. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis :

III.4.1. Formulation variationnelle forte :

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s'écrit alors comme suit **[36,37]:**

Trouver $U(x)U(x) \in$ espace des solutions *US* tel que

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

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

III.4.2 Formulation vibrationnelle faible:

La formulation variation elle faible peut être obtenue par les étapes suivantes :

1) approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par u tel que **[38]**

$$\tilde{u} = \sum_{i=1}^{n} N_i \, \tilde{u}_i \qquad \text{(III.3)}$$

Ou $N_i = N_i(x, y)$ désignent les fonctions de forme u et des valeurs nodales indéterminées.

2) introduire (III-1) dans (III-1) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que

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

Ou $\varepsilon = 0$, $u = u$ c.à.d. lorsqu'une solution exacte existe.

3) obtenir une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire W talque

$$\int w \, (\mathcal{L}(\tilde{u}) - F) \, d\,\Omega = 0, \; k = 1, 2 \ldots\ldots N \qquad \text{(III.5)}$$

Ou N Nombre d'inconnues indépendants du système (III-1).

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

On pose

$$w_k = N_k \Longrightarrow \int N_k \, \mathcal{L}(\sum_{i=1}^{n} N_i \tilde{u}_i) d\,\Omega = 0 \qquad \text{(III.6)}$$

On dit que u $\in H_0^1(\Omega)$ est une solution faible de (III5) si :

$$\forall \, v \in (\Omega) H_0^1 a(\tilde{u}, v) \qquad \text{(III.7)}$$

A (u, v) est la forme bilinéaire associée à $(\mathcal{L})$ Soit Ω un ouvert borné de Rd et $\partial\Omega$ est régulier.

On considère alors le problème :

$$Lu = f \text{ sur } \Omega \text{ et } u = 0 \text{ sur } \partial\,\Omega = 0 \qquad \text{(III.8)}$$

III.5. Discrétisation :

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

$$\left[A_e^{transient}\right] + \left[A_e^{advection}\right] + \left[A_e^{diffusion}\right](\emptyset_e) = \left(S_e^{\emptyset}\right) \quad \text{(III.9)}$$

Pour les intégrales élémentaire, La méthode Galerkin des résiduels pesés est employé **[35].**

III.5.1. Terme temporelle :

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[35]:**

$$\left[A_e^{transient}\right] = \int w^e \frac{(\partial \rho c_{\emptyset} \emptyset)^e}{\partial t} \mathrm{d}\ (\mathrm{vol}) \quad \text{(III.10)}$$

Avec : $\boldsymbol{w^e}$**:** La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme.

Pour le nœud i:

$$\int w^e \frac{(\partial \rho c_{\emptyset} \emptyset)^e}{\partial t} \mathrm{d}(\mathrm{vol}) = \int w_i^e \rho c_{\emptyset} w_j^e \mathrm{d}(\mathrm{vol}) \frac{\partial \emptyset_i^e}{\partial t} w_j^e \mathrm{d}(\mathrm{vol}) \emptyset_j^e \quad \text{(III.11)}$$

Les indices inférieurs i et j indiquent le nombre de nœud. Si la deuxième partie de l'équation (III-10) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme:

$$\mathrm{M_{ij}} = \int w_i^e \rho c_{\emptyset} \mathrm{d}(\mathrm{vol}) \quad \text{(III.12)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$\mathrm{M_{ij}} = \delta_{ij} \int w_i^e \rho c_{\emptyset} \mathrm{d}(\mathrm{vol}) \quad \text{(III.13)}$$

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

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

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

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

Ou: δ = coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark

L'équation (III-14) est écrite comme suite:

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

III.5.2. Terme d'advection:

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

III.5.2.1 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.

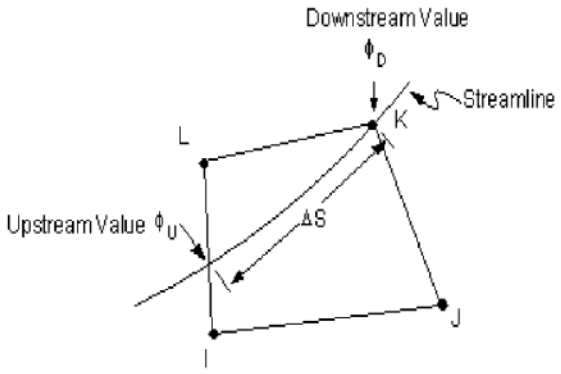


Figure. III.2 :L'approche de ligne de courant d'upwind [35]

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:

$$\frac{\partial(\rho V_x c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y c_\emptyset \emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho V_s c_\emptyset \emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III.16)}$$

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho V_s c_\emptyset \emptyset)}{ds} \int w^e \mathrm{d(vol)} \qquad \text{(III.17)}$$

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 **[35]:**

$$\frac{d(\rho V_s c_\emptyset)}{ds} = \frac{(\rho V_s c_\emptyset \emptyset)_u - (\rho V_s c_\emptyset \emptyset)}{Ds} \qquad \text{(III.18)}$$

Ou : D : l'indice de la valeur on niveau du nœud aval.

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

$\Delta s =$ 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.5.2.2 La 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 **[36]:**

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int w^e \left(\frac{\partial(\rho V_x c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right) \mathrm{d(vol)} C_{2\tau} \int \frac{zh}{2u_{max}} \left(\frac{V_x \partial \omega^e}{\partial_x} + \frac{V_y \partial \omega^e}{\partial_y}\right) \left(\frac{V_x \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right) \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.19)}$$

Où : $C_{2\tau}$= coefficient global réglé à 1,0.

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

$$U_{mag} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad \text{(III.20)}$$

$$z = \begin{cases} 1 & si\ 0 \le p_e < 3 \\ \dfrac{p_e}{3} & si\ p_e \ge 0 \end{cases}$$

$p_{e=}\frac{\rho c_p u_{mag} h}{2\Gamma_\emptyset}$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 **[35].**

III.5.2.3 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 [36].

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left(\frac{\partial(\rho V_x c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_x c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right) d(vol) + C_{2\tau} \int \frac{zh}{2u_{mag}^e} \left(\frac{V_x^e \partial W^e}{\partial_x} + \frac{V_y^e \partial W^e}{\partial_y}\right) \left(\frac{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho V_y c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right) \quad \text{(III.21)}$$

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

III.5.3 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

$$\text{Diffusion contribution} = \int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) \mathrm{d(vol)} + \int W^e \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.22)}$$

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

$$\int W^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) \mathrm{d(vol)} = \int \frac{\partial W^e}{\partial x} \Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x} \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.23)}$$

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

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

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

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[A_e^{diffusion}\right] = \int \left(W_x^e \Gamma_\emptyset W_x^e + W_y^e \Gamma_\emptyset\right) \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.26)}$$

III.5.4 Termes source :

L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[35]:**

$$S_\emptyset^e = \int W^e S_\emptyset \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.27)}$$

III.6. Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini :

III.6.1. Bilan Thermique : Equation De Chaleur :

Soit v une partie quelconque de **V** limitée par la surface s

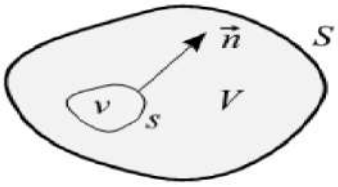


Figure.III.3 : bilan thermique

La puissance thermique stockée dans **v** est égale à la somme de la puissance thermique $\boldsymbol{q}$ générée par les sources volumiques contenues dans **V** et de la puissance thermique reçue sous forme de flux à travers la surface **S**:

$$\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -\vec{n}\left(-\bar{\bar{\lambda}}\overrightarrow{grad}\mathrm{T}\right) ds \qquad \text{(III.28)}$$

Le domaine v étant arbitraire, on en déduit : en tout point du solide :

$$\rho c_p \dot{T} - \mathrm{div}\left(\bar{\bar{\lambda}}\overrightarrow{grad}\mathrm{T}\right)\mathrm{q} = 0 \qquad \text{(III.29)}$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (III-29) s'écrit dans le repère orthonormé {x, y} **[35]** :

$$\rho c_p \dot{T} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \mathrm{q} \qquad \text{(III.30)}$$

Où : $\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t}$

III.6.2. Forme discrétisée : éléments finis :

La solution analytique de l'équation (III- 31) est en général inaccessible. On est donc conduit à chercher une solution approchée par une méthode numérique : la méthode des éléments finis. Cette méthode est un cas particulier de la méthode de Galerkin : le champ de températures et les fonctions test appartiennent au même espace de dimension finie.

Le domaine V est décomposé en sous-domaines Ve de forme géométrique simple (les éléments) relies entre eux en des points appelés nœuds. Cette opération s'appelle maillage.

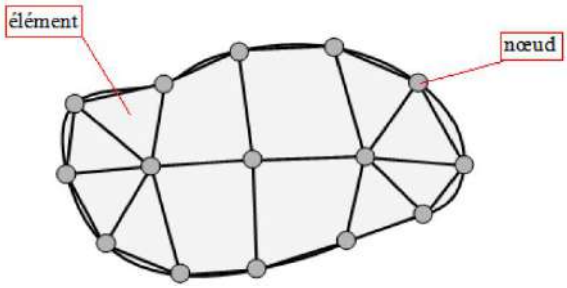


Figure. III.4 : domaine plan discrétisé en 12 élément relies eux par 15 nœuds.

III.6.3. Représentation élémentaire (ou locale) du champ de températures:

Le champ de températures T (x, y, t) dans l'élément (e) à pour expression.

$$T^e(x,y,t) = [N_1^e(x,y) \dots N_i^e(x,y) \dots N_{n^e}^e(x,y)] \begin{Bmatrix} T_1^e(t) \\ T_i^e(t) \\ T_{n^e}^e(t) \end{Bmatrix} \qquad \text{(III.31)}$$

$$T^e(x,y,T) = [N^e(x,y)]\left(T_{(t)}^e\right)$$

Où :

- n^e est le nombre de noeuds de l'élément.
- les fonctions $N_i^e(x,y)$ sont les fonctions d'interpolation élémentaires
- la matrice N^e est la matrice d'interpolation élémentaire
- le vecteur $T_{(t)}^e$ regroupe les températures des nœuds de l'élément (e)

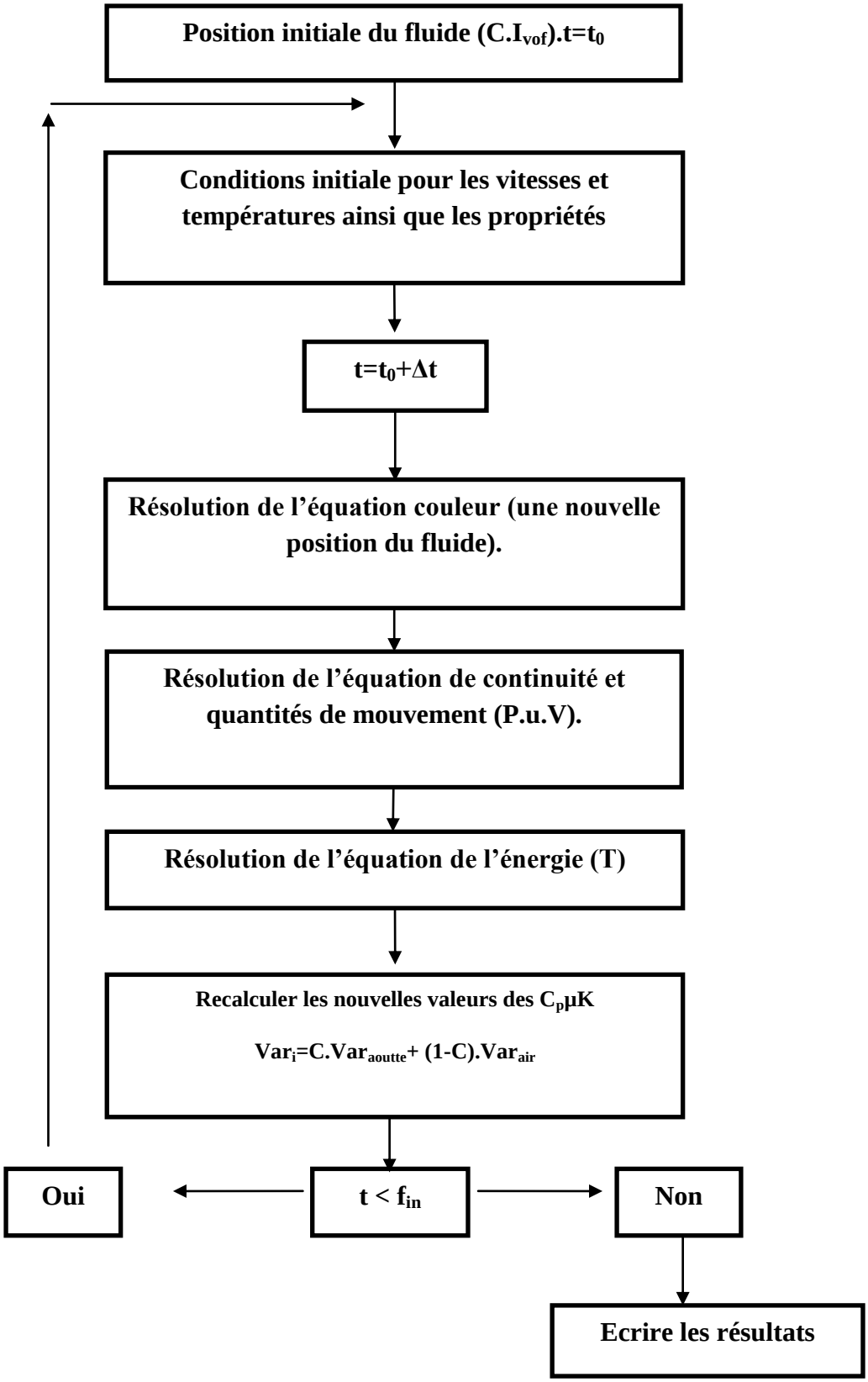


Figure. III.5 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps

III.7. Conclusion :

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

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

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentant les résultats de l'étude de la situation numérique de l'impact de goutte creux d'aluminium sur un substrat d'acier d'un part ; et d'autre part l'influence de l'impact oblique sur la formation de lamelle.

IV.2. Logiciel d'analyse d'ANSYS :

ANSYS est un logiciel de calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristique ou blocs fonctionnels décrits sur la figure

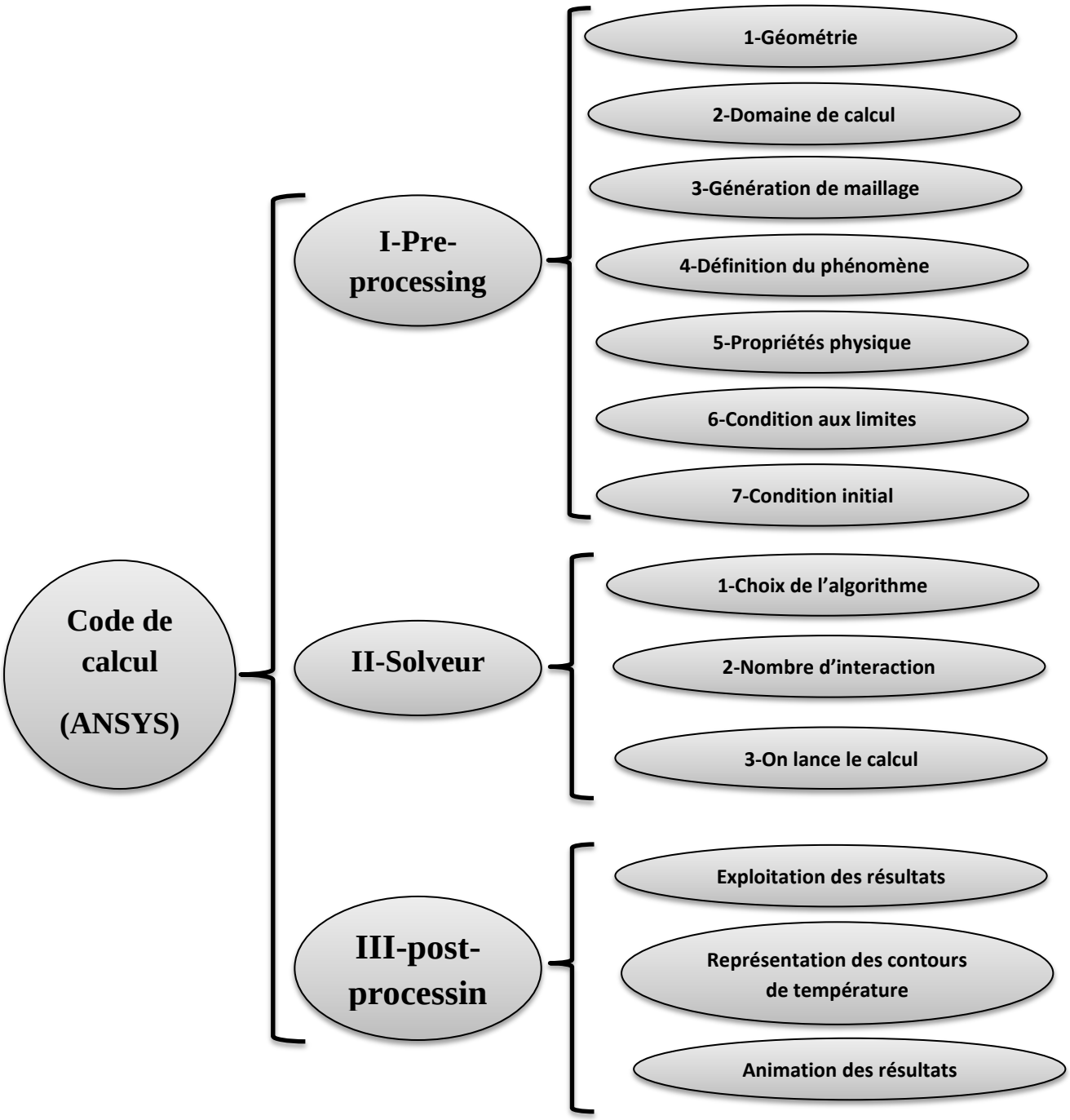


Figure IV–1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.3. Matériaux utilisés :

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

IV.3.1. L'alumine [39,40]:

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

* 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 Ohm. m

* une dureté HV sous une charge de 1N de 9,21 GPa

* une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'alumine par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10 – 5mm^3/Nm, à l'abrasion par une bille de Sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5 N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à 3.10^{-3} mm^3 /Nm lorsque la température augmente à 400^{O}C.

* une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux alcalins, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance à l'oxydation.

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

* les applications mécaniques, l'alumine est l'abrasif le plus répandu à côté du carbure de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides.

* les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'alumine sert à protéger l'acier contre la corrosion a haute températures.

* les applications médicales ; le caractère biocompatible de l'alumine permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie.

* les applications électriques et électroniques : l'alumine est utilisée dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation.

*les applications optiques : les films d'alumine permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires.

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

Propriétés	**Alliage d'aluminium**	**Acier d'outil**
Densité (kg/m^3)	2570	7800
Température de fusion en ^{o}c	570	-
Chaleur de fusion [j/kg]	389	-
Viscosité cinématique en [m^2/s]	^{o}C 0 4.5E-7 700 4E-7	-
Conductivité thermique liquide [W/m K]	70	-
Chaleur spécifique liquide [j/kg k]	1000	-
Tension superficielle [N/m]	1.07	-
Conductivité thermique solide [W/m K]	T(c°) λ 100 144.5 200 147.5 300 152.5 400 148	T(c°) λ 27 17.6 204 23.4 427 25.1 649 26.8
Chaleur spécifique [j/kg k]	T(c°) C_P 300 980 400 1050 479 1150	T(c°) C_P 20 460 500 550 600 590

Tableau IV -1 : propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. [41]

IV.4. Identification:

Pour l'identification, ou l'objective est de justifie le model utilisé ; nous proposons pour cet première partie de travail de comparer nos résultats de simulation d'impact de goutte sur substrat dans les mêmes condition des travaux numérique et expérimental de Arvind Kumar [42].

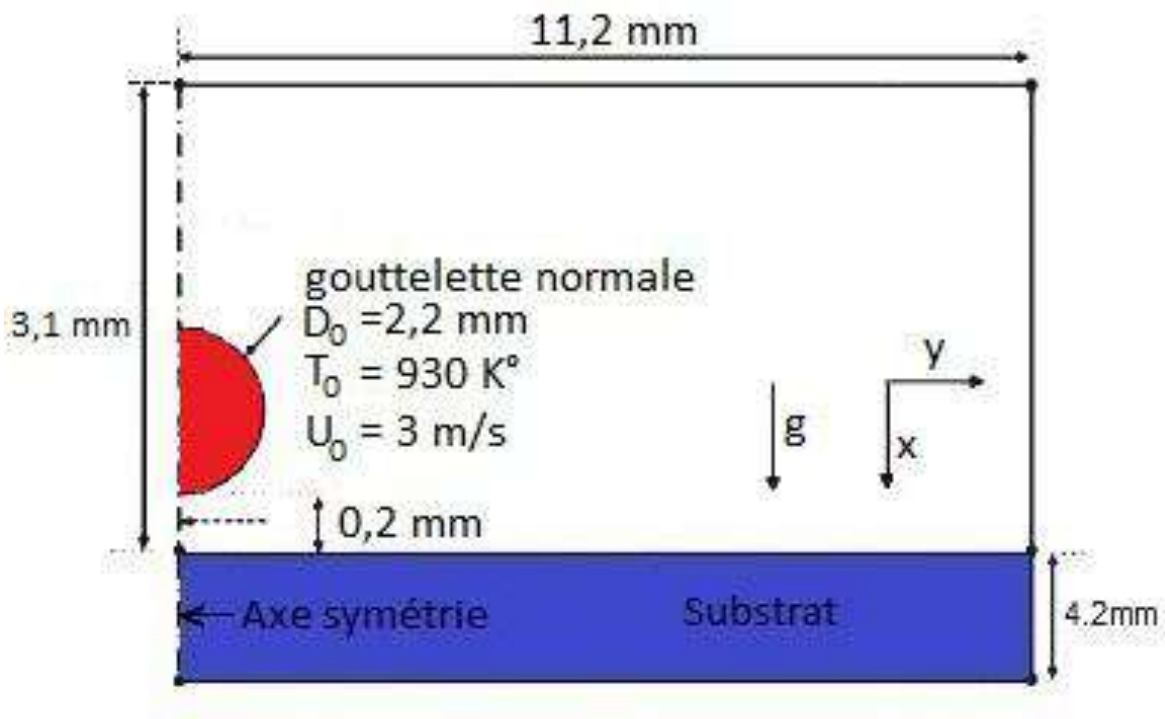
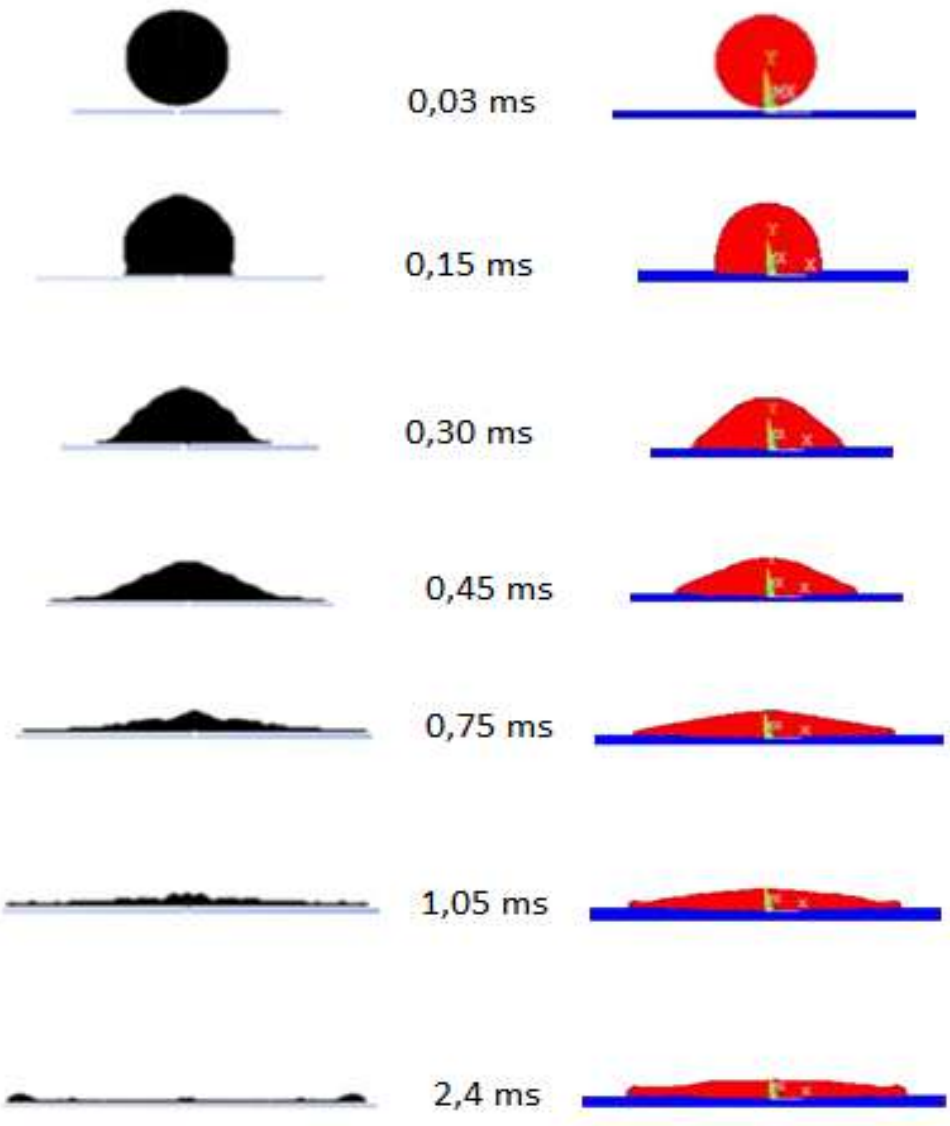


Figure IV– 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de l'identification.

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

La figure IV-3 représente les résultats expérimentaux et de simulation d'étalement d'une particule en aluminium plein d'un diamètre de 2.2mm initialement à une température de 630 C° et une vitesse de 3 m/s sur un substrat en acier d'outil initialement à 200 C°. la gouttelette commence à se propagée à 0.03 ms, symétriquement par rapport au point d'impacts, il faut noté que pour les deux résultats le liquide suit la topographie de la surface.



A **B**

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

A : résultats expérimental d'Arvind Kumar [42].

B : notre résultats de calcule.

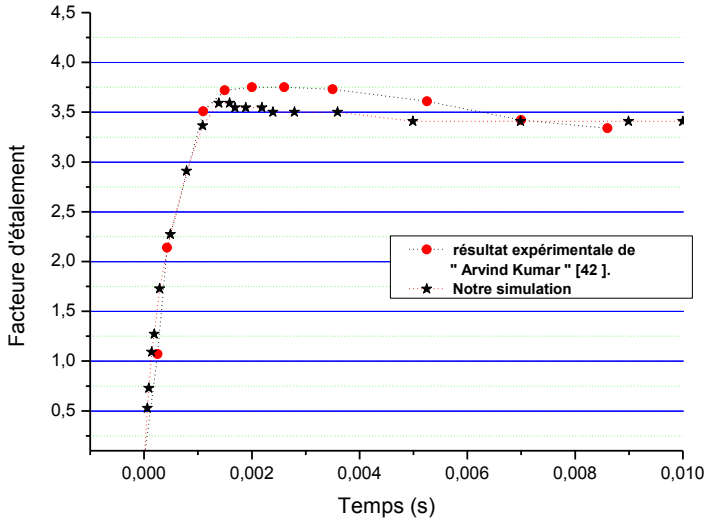


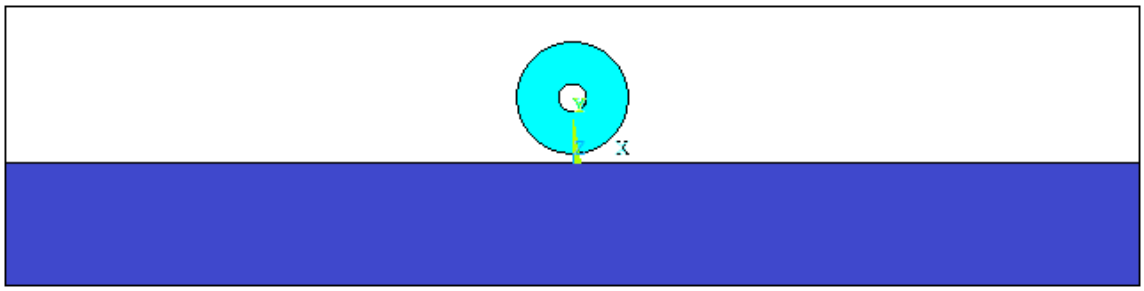
Figure IV- 4 : facteurs d'étalement.

Sur la figure IV- 4, qui est une représentation comparative des facteurs d'étalement ; ou on constats un bon accord, cependant Le temps d'étalement totale de la particule pour les deux cas est égale à 3.55 – 3.7, ainsi que le dimension finale du lamelle formée correspond à un facteur de 3.4 pour les deux cas.

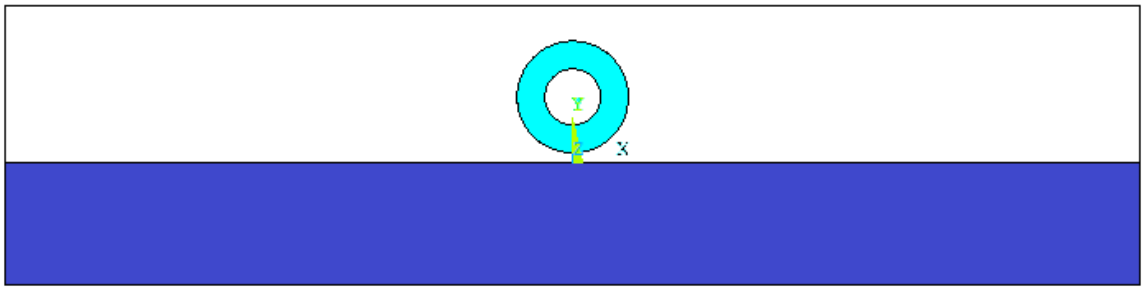
Après la comparaison entre les deux essais ont trouvé convergence dans l'élément de ce que nous pouvons compter sur les valeurs en vigueur.

IV.6. Description du domaine d'application :

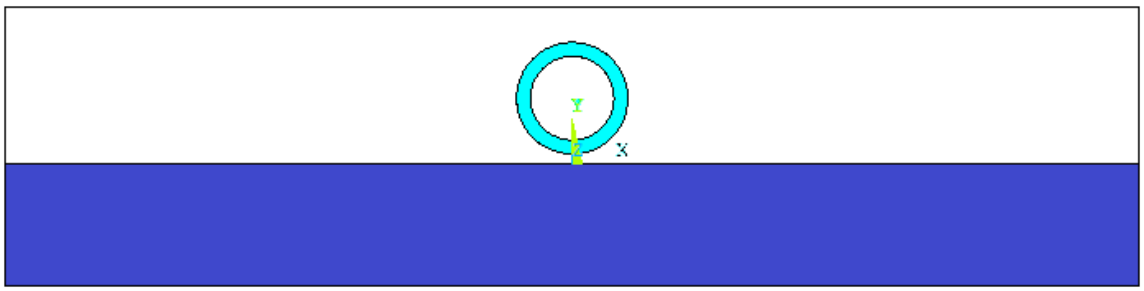
Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impacte d'une particule en aluminium creuse (bulle d'air) déposée sur substrat en acier ,pour trois cas (R1,R2,R3) possible de presence de vide comme c'est represente sur la figure (IV– 5).



R1 : Diamètre de vide d_0 = 25% de D_0



R2 : Diamètre de vide d_0 = 50% de D_0



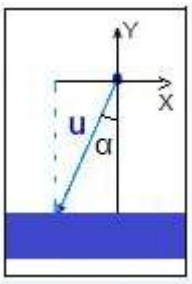
R3 : Diamètre de vide d_0 = 75% de D_0

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

En vue de l'étude de l'influence de degré d'inclinaison à l'impact d'une particule creuse nous avons été appelé :

- A étudier trois cas de gouttelette creuse à différent diamètre de vide (25% ,50%,75%).

- A étudier Pour chaque cas l'influence de l'angle d'impact (α=0°, α=8°, α=10°, α=12°, α=15°) et pour chacun nous avons :



$$tg_{\alpha} = \frac{v_x}{v_y} \qquad \begin{cases} V_x = u.\sin\alpha \\ V_y = u.cos\ \alpha \end{cases}$$

Figure IV- 6 : schématisation de l'angle caractéristique de l'impact oblique

- Représenté la variation de pression pour trois d'impact par rapport au temps.
- Représenté la variation de température pour cinq position dans le substrat et cela par rapport au temps.
- Représenté la variation du d'étalement par rapport au temps.

IV.7. Diamètre de vide d_0 = 25% de D_0:

La figure IV-7-A-1 représente pour chaque (α) la distribution de température pendant l'impact d'un gouttelette creuse a diamètre d_0= 25% de D_0 qui ont une température de 630 C° dans substrat à 200 C°. ou 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.

Pour α = (0°) :

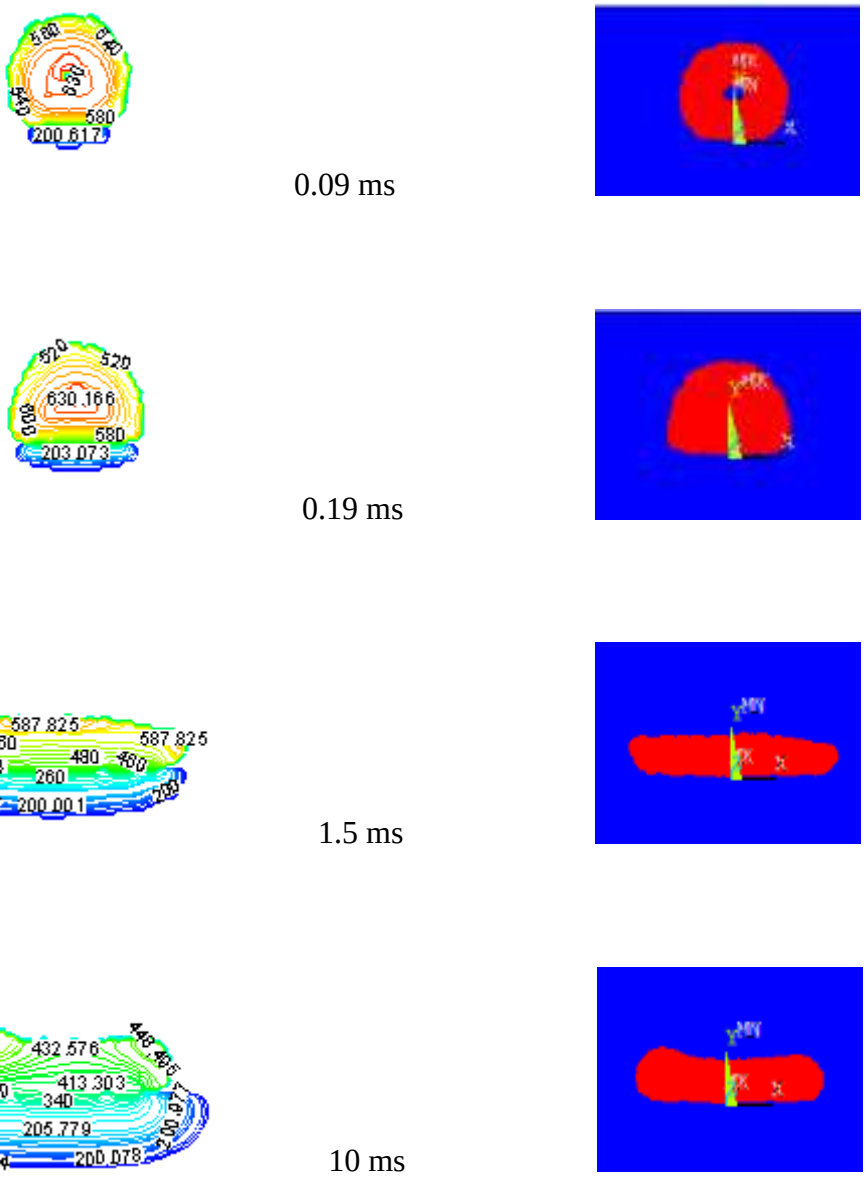


Figure IV-7-A-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

Nous avons mesuré la pression au niveau de trois points (X_1, X_2, X_3) à la surface de substrat, En ce qui concerne la température on a mesuré à cinq points (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5).

Remarque : Cette procédure s'applique à tous les stades de la suivante.

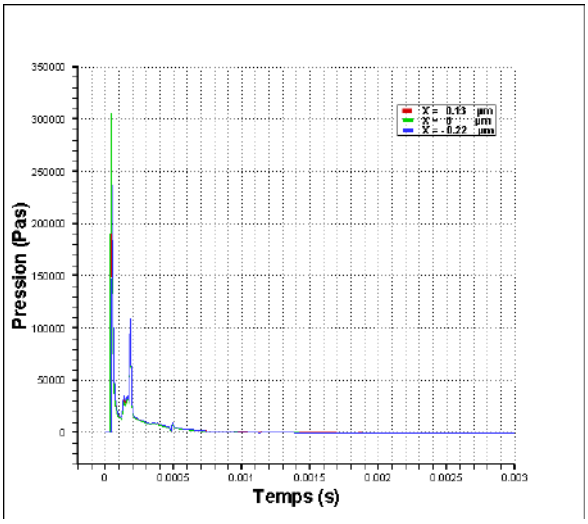


Figure IV-7-A-2 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

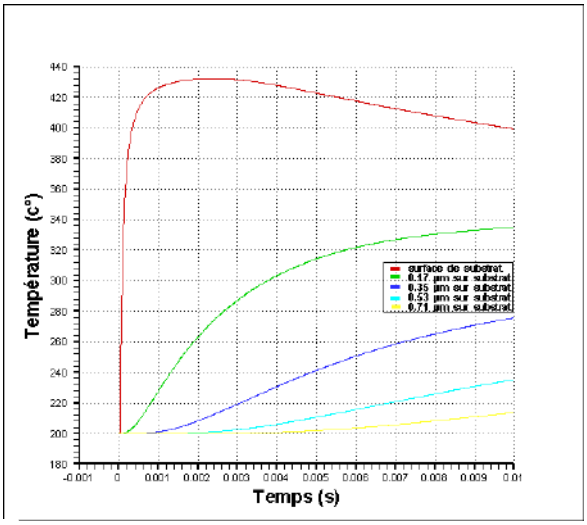


Figure IV-7-A-3 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

La **figure IV-7-A-2** représente une comparaison entre la variation de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression jusqu'à (307000Pas). La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, alors on peut conclure que la dynamique a donc une influence importante sur les phénomènes thermiques.

Par comparaison entre la variation de la température dans le substrat lors de l'impact d'une goutte d'aluminium creux sur un substrat d'acier. La **figure IV-7-A-3** qui représente un comportement identique sur le substrat pendant le premier moment de l'impact, on note cependant que dans un second temps on constate un comportement relativement similaire dans l'allure de variation, et on note que les valeurs des températures pour le point de contact plus élevées, mais les valeurs des températures des points dessous dans substrat diminue.

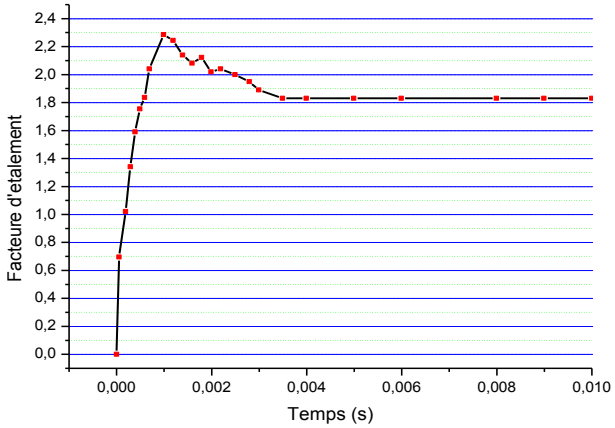


Figure IV-7-A-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2,3 dons un T= 1ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (8°) :

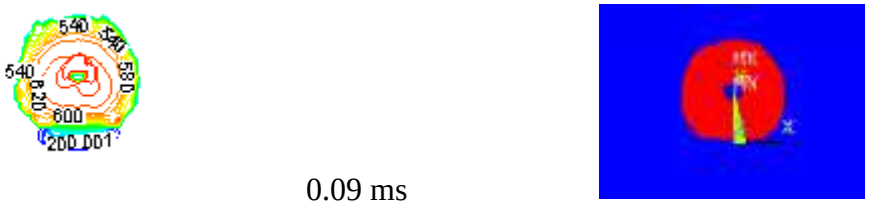


Figure IV-7-A-5 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

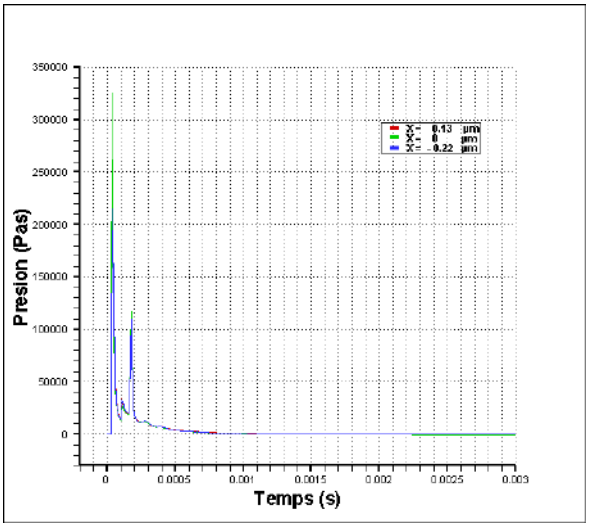


Figure IV-7-A-6 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

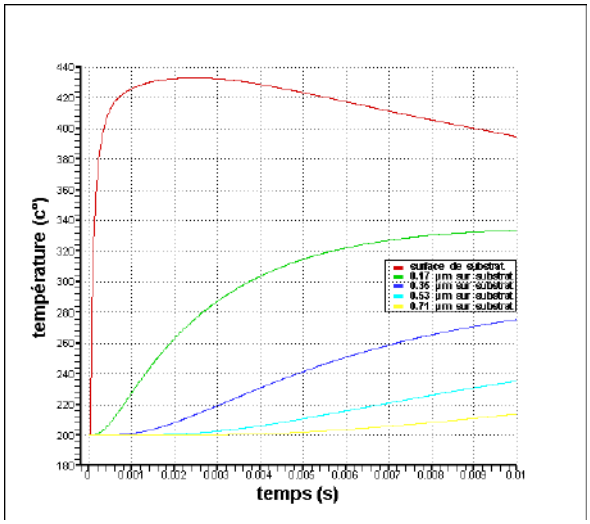


Figure IV-7-A-7 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

La **figure IV-7-A-6** représente une comparaison entre la variation de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression dans 325000(Pas). La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, alors on peut conclure que la dynamique a donc une influence importante sur les phénomènes thermiques.

La Figure IV-7-A-7 nous notons le même résultat pour la Figure IV-7-A-3

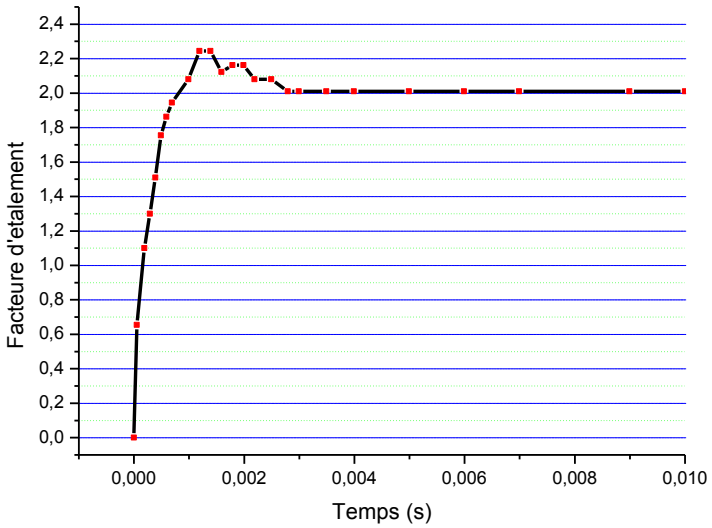


Figure IV-7-A-8 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2,28 dons un T= 2,8ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (10) :

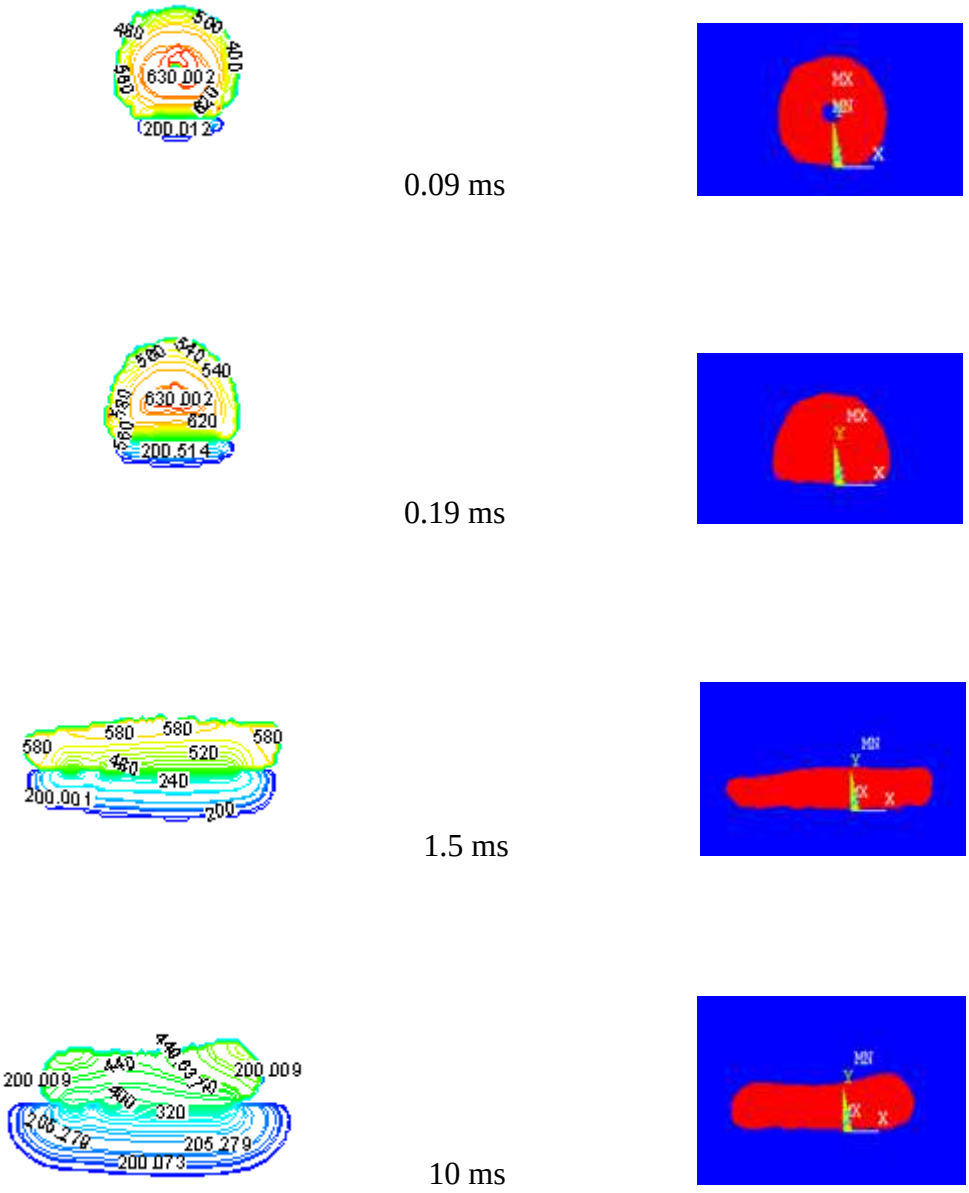


Figure IV-7-A-9 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

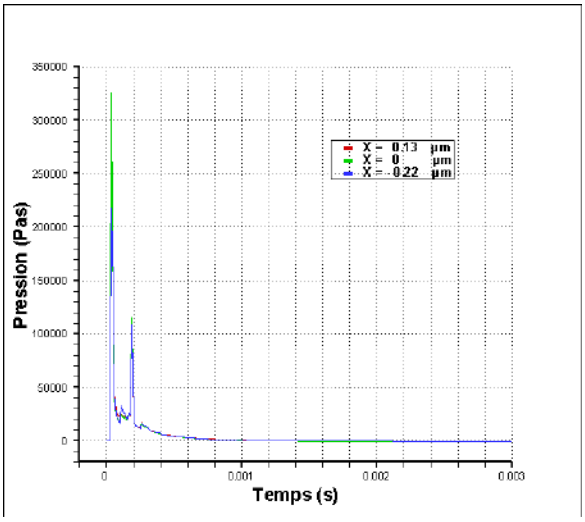


Figure IV-7-A-10 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

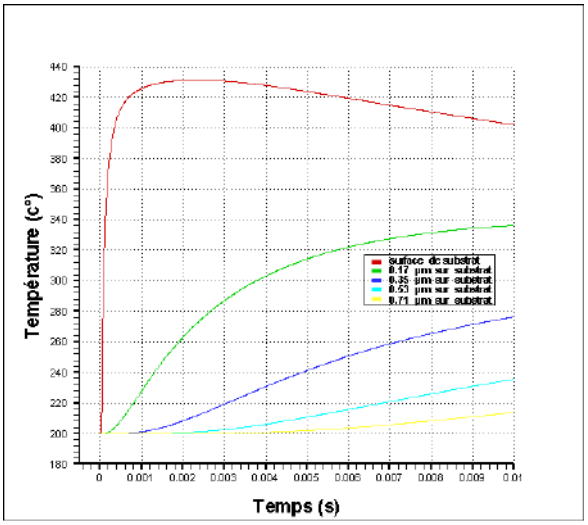


Figure IV-7-A-11 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

La Figure IV-7-A-10 même résultat pour la Figure IV-7-A-6.

La Figure IV-7-A-11 le même résultat pour la Figure IV-7-A-3

Alors : les graphes des températures ont les même résultats dans chaque(α).

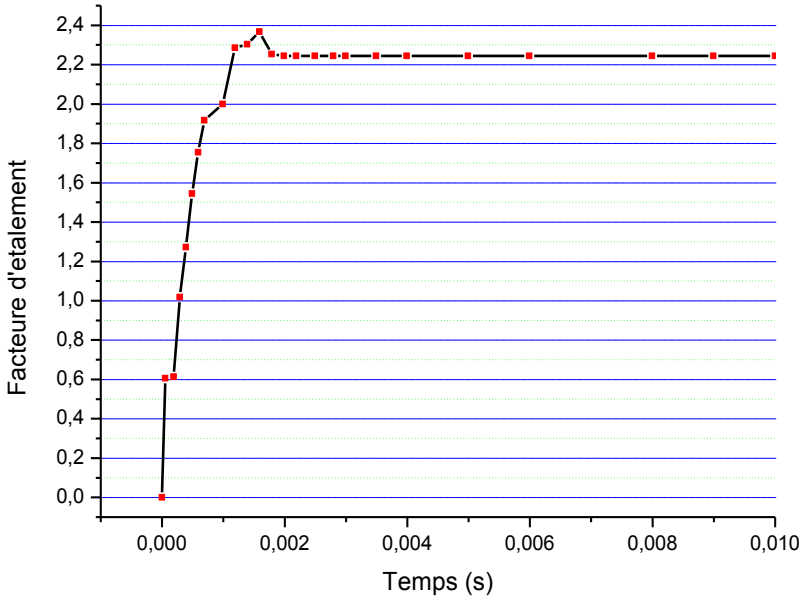


Figure IV-7-A-12 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2,4 dons un T= 1,7ms. Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (12°) :

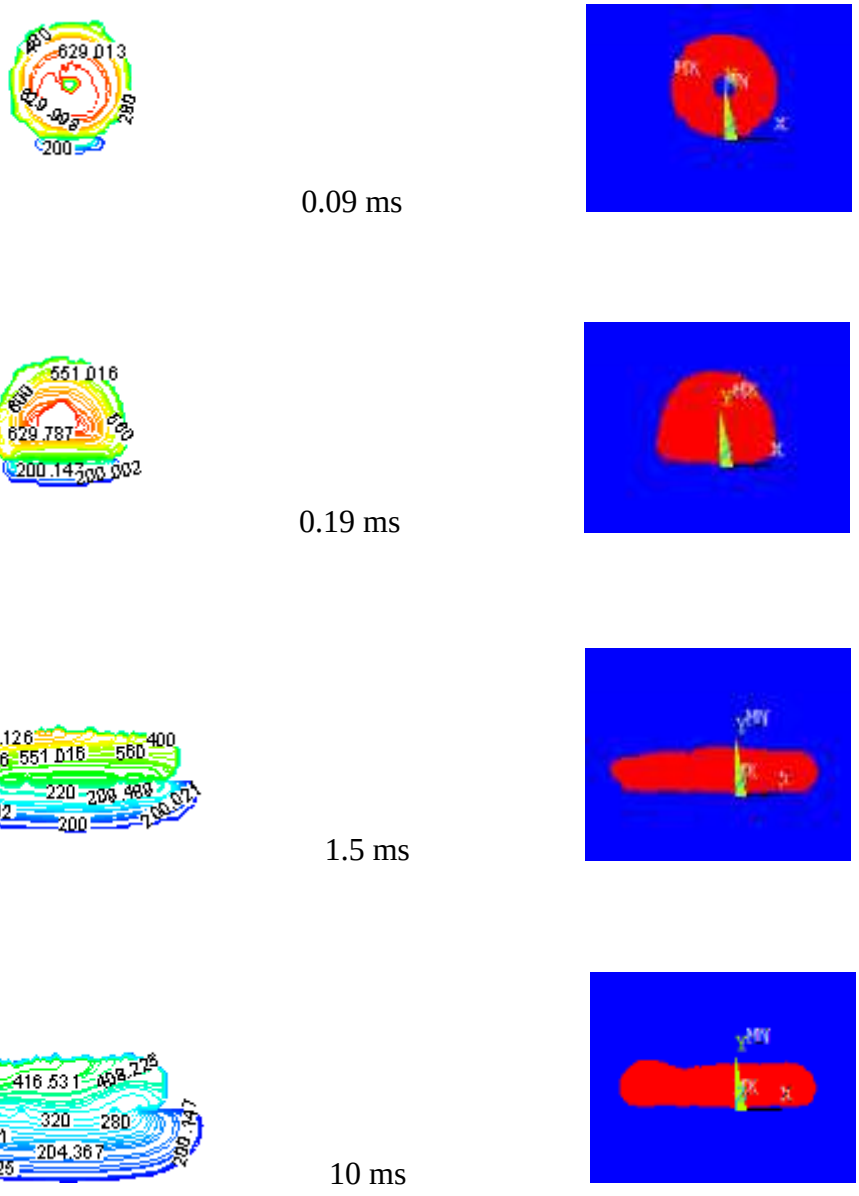


Figure IV-7-A-13 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

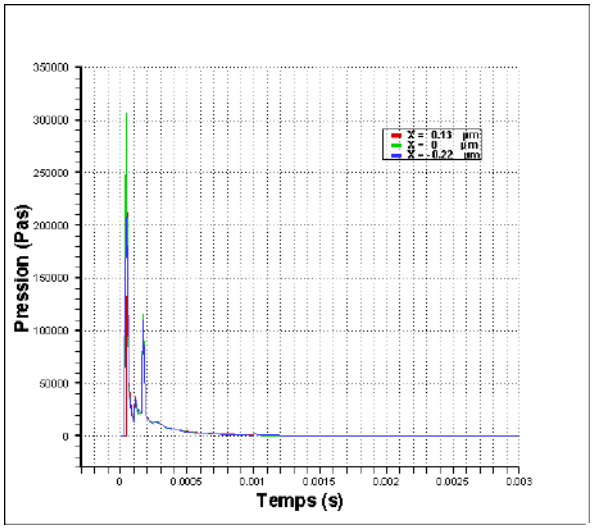


Figure IV-7-A-14 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

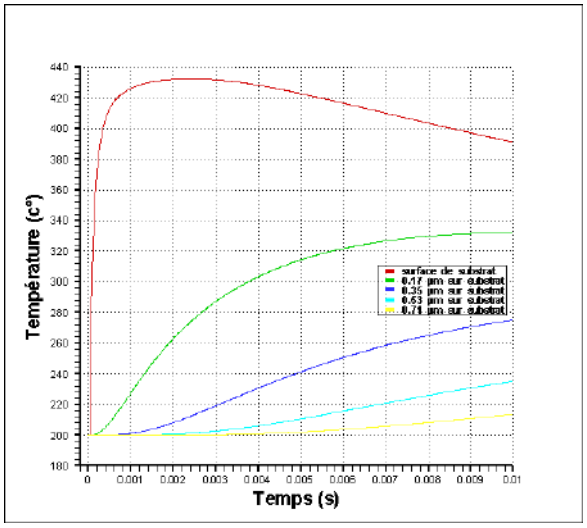


Figure IV-7-A-15 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

La Figure IV-7-A-14 même résultat pour la figure IV-7-A-2

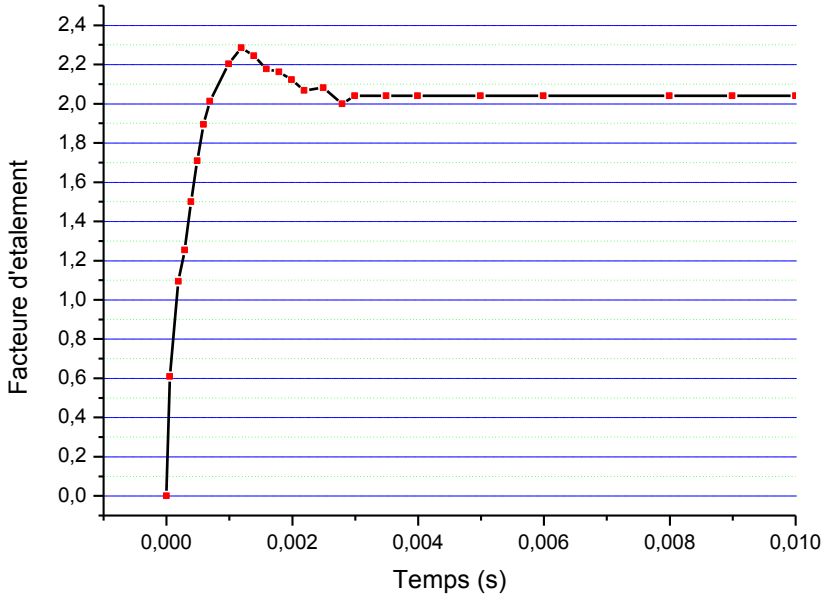


Figure IV-7-A-16 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

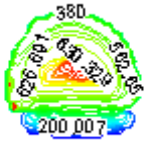
L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2,3 dons un T= 1,2ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (15°) :



0.09 ms



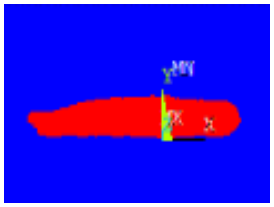


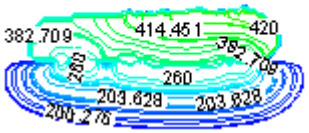
0.19 ms





1.5 ms





10ms

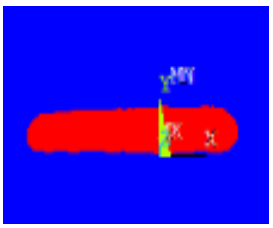


Figure IV-7-A-17 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

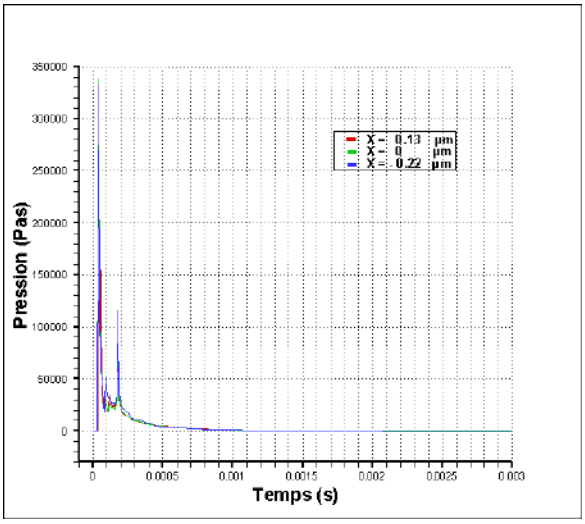


Figure IV-7-A-18 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

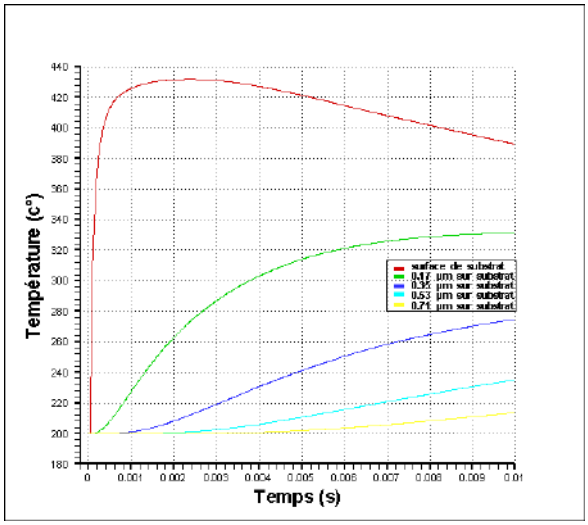


Figure IV-7-A-19 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

La figure IV-7-A-18 représente une comparaison entre la variation de la pression d'impact dans le temps pour différents point de contact, on remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat en générant une forte pression dans 34000(Pas). La résistance thermique de contact est minimale jusqu' à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contacte augmente cependant on constate que la pression générée dans les cas est permet de transférer d'une quantité d'énergie plus élevée vers le substrat, et donc les particules sont rapidement refroidies, alors on peut conclure que la dynamique a donc une influence importante sur les phénomènes thermiques.

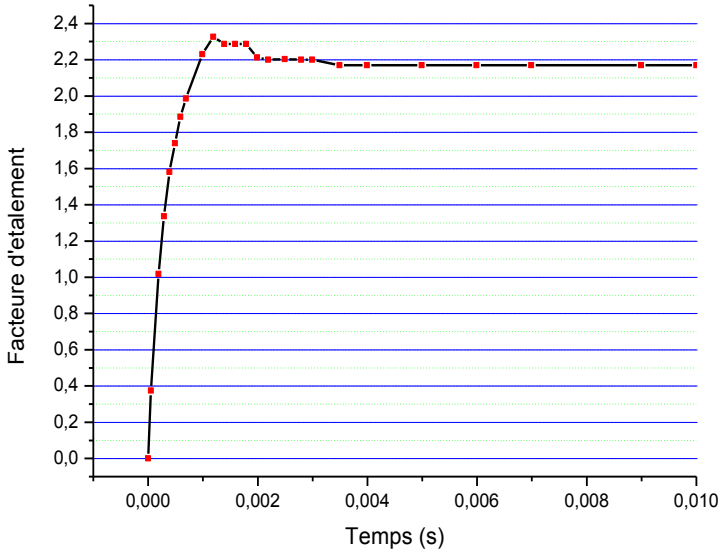


Figure IV-7-A-20 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et les support jusqu'à la valeur 2,31 dons un T= 1,1ms, Finalement l'impact stabilise.

IV.8. Diamètre de vide d_0 = 50% de D_0:

La figure IV-7-B-1 : représente pour chaque (α) la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette creuse a diamètre d_0= 50% de D_0 qui ont une température de 630 C° dans substrat à 200 C°. Ou 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.

Pour α = (0°) :

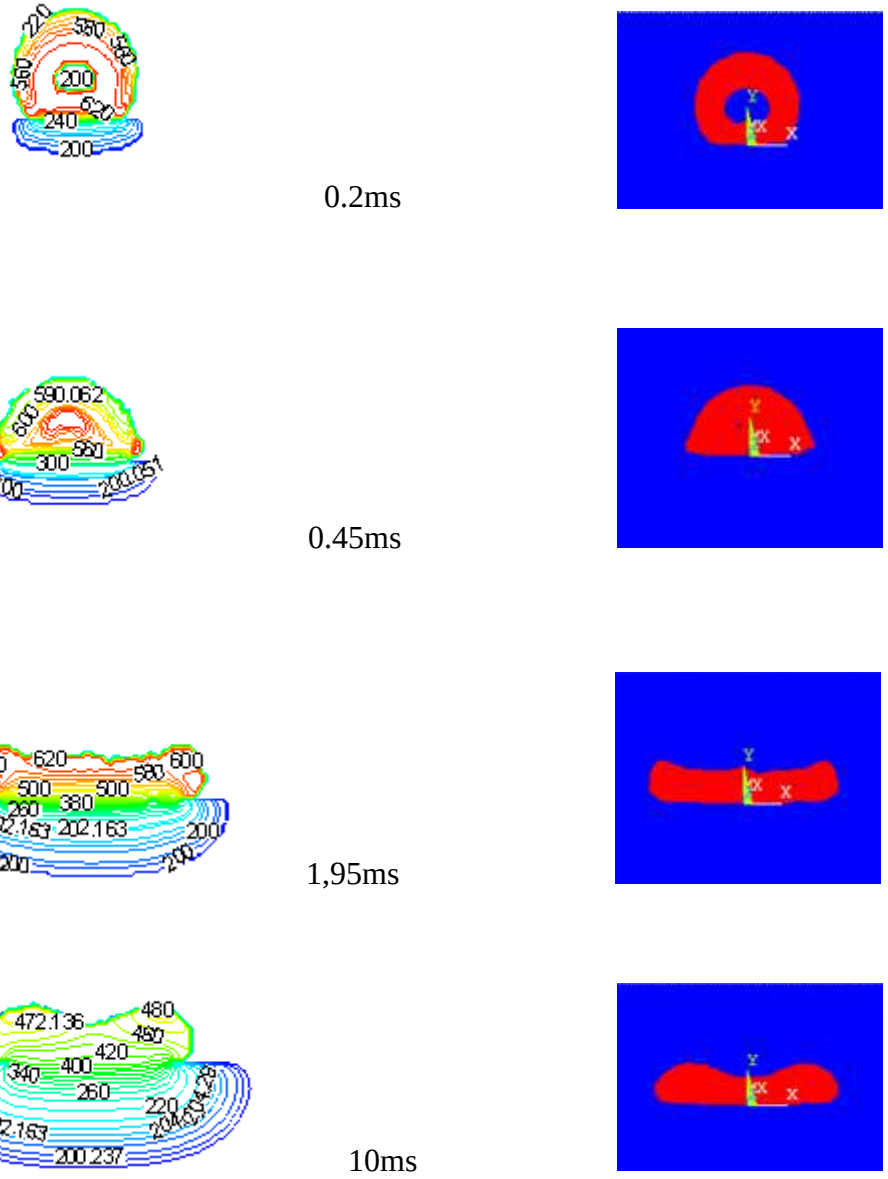


Figure IV-7-B-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

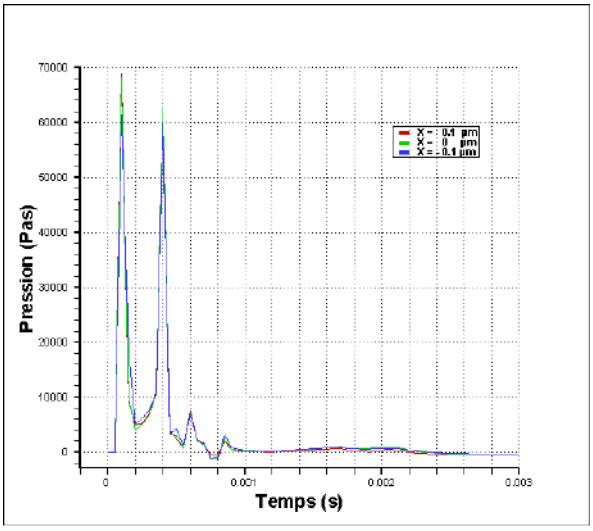


Figure IV-7-B-2 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

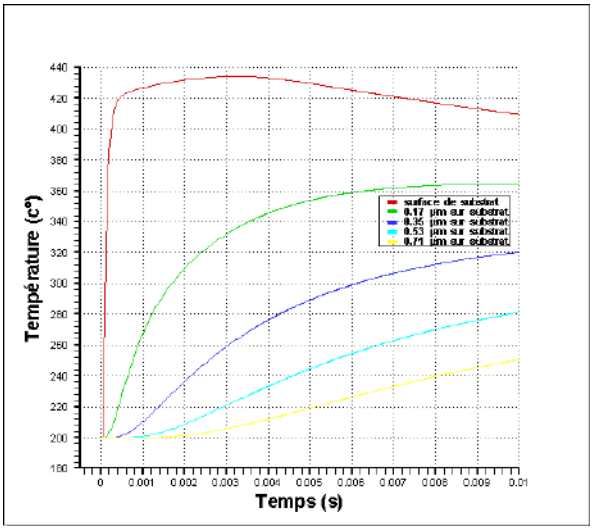


Figure IV-7-B-3 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

La **figure IV-7-B-2** représente une comparaison entre la variation de la pression d'impact dans le temps pour différents type d'impact. On remarque que la goutte s'écrase sur la surface de substrat d'impact avec une pression diminue pour le premier cas et arrivé jusqu'à la valeur 68000(Par). Avec le temps cette pression se minimise jusqu'à ou elle devient nulle.

La figure IV-7-B-3 montrent l'apparition des zones de bon et de mauvais contact a l'interface particule /substrat ce qui favorise le transfer de chaleur transversal vers le substret et nom pas radailement dans la lamelle cela explique la température quasi-constante en profondur du substrat.

On peut constater aussi que, aux premiers instants suivant le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement.

Remarque : Tous les graphes de pression et température ont les mêmes résultats dans chaque (α).

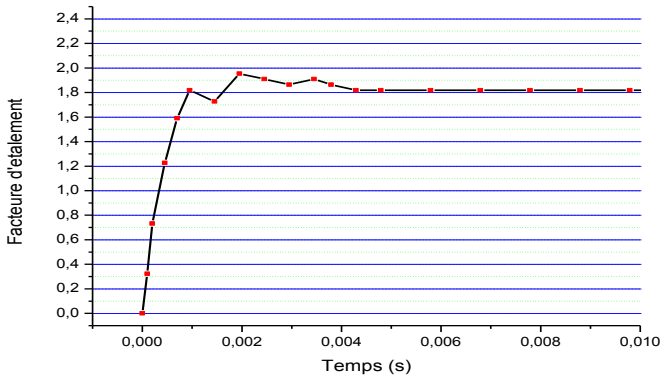
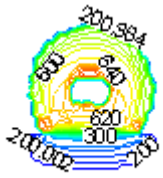


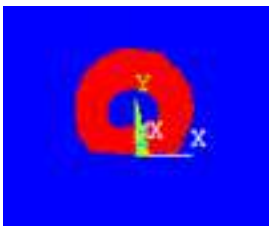
Figure IV-7-B-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

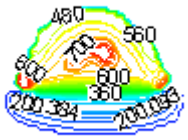
L'étalement de la particule et les support jusqu'à la valeur 2 dons un T= 1ms , Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (8°) :

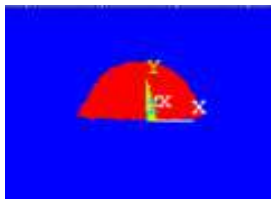


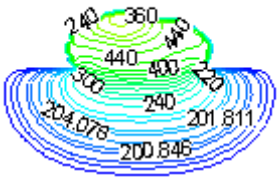
0.2ms



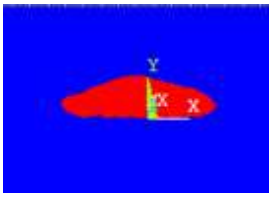


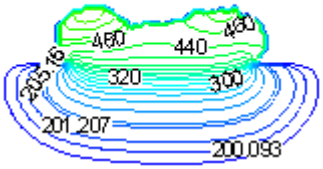
0.45ms





1.95 ms





10ms

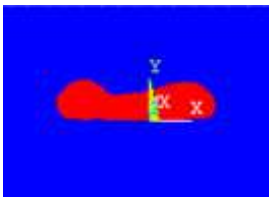


Figure IV-7-B-5 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

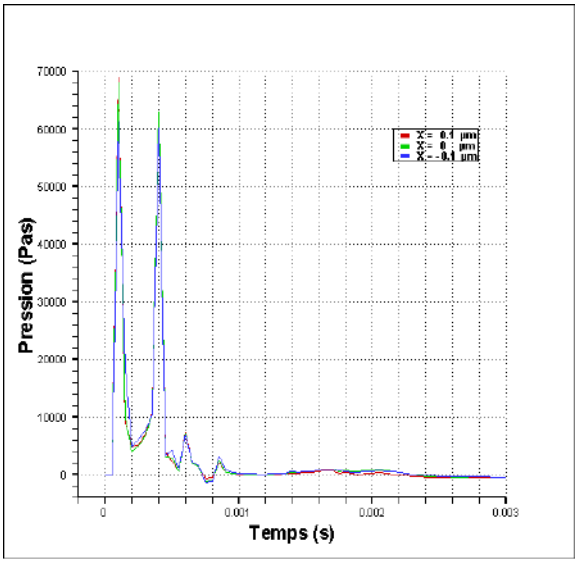


Figure IV-7-B-6 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

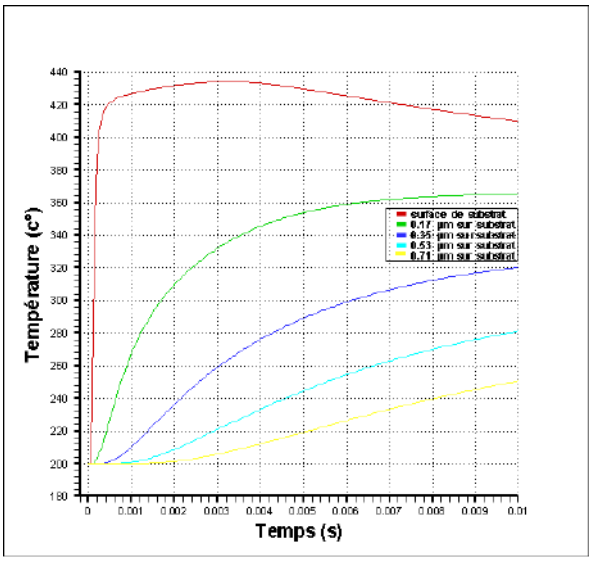


Figure IV-7-B-7 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

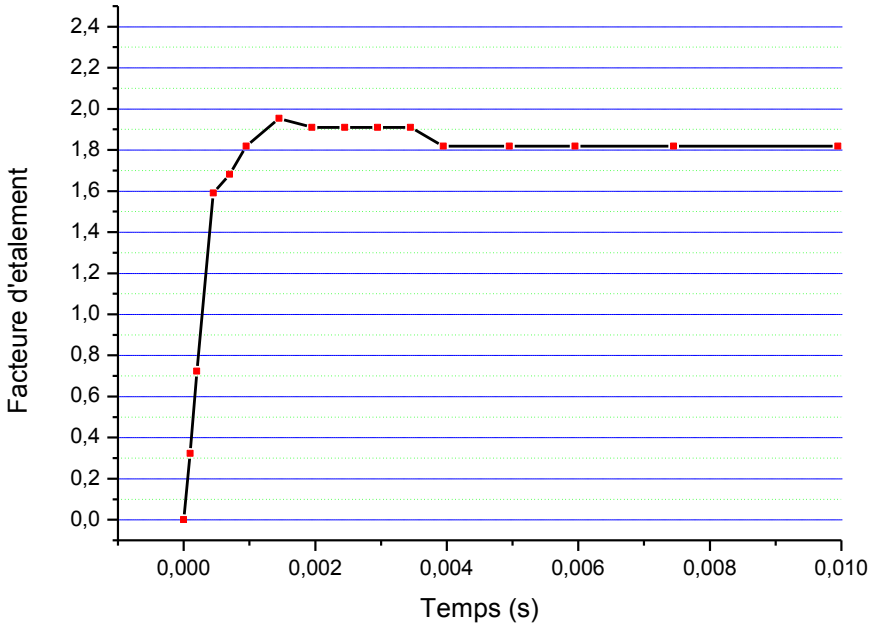


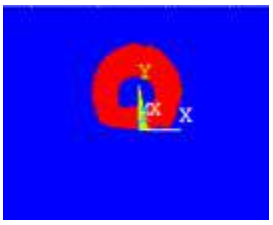
Figure IV-7-B-8 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

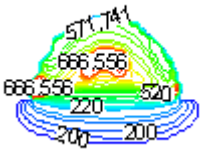
L'étalement de la particule et les support jusqu'à la valeur 2,3 dons un T= 1,4ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α= (10°) :



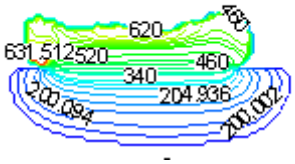
0.2ms



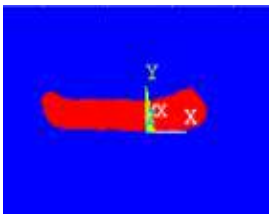


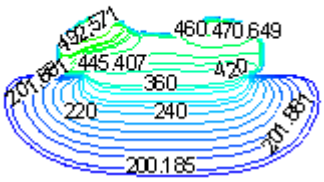
0.45ms





1.95ms





10ms

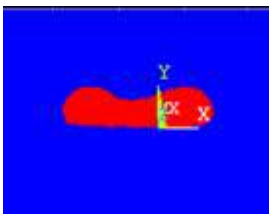


Figure IV-7-B-9 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

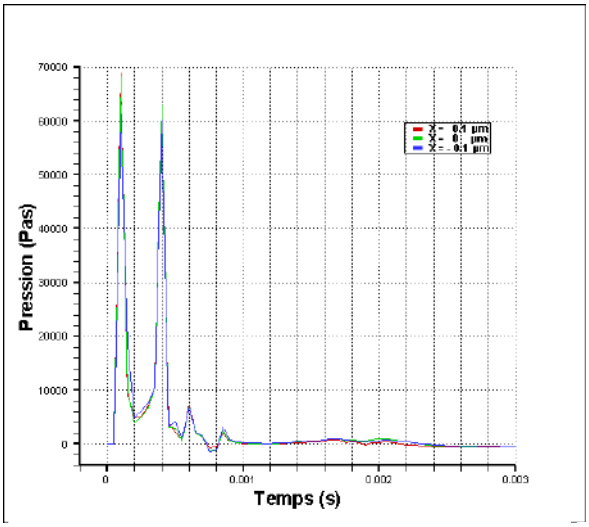


Figure IV-7-B-10 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

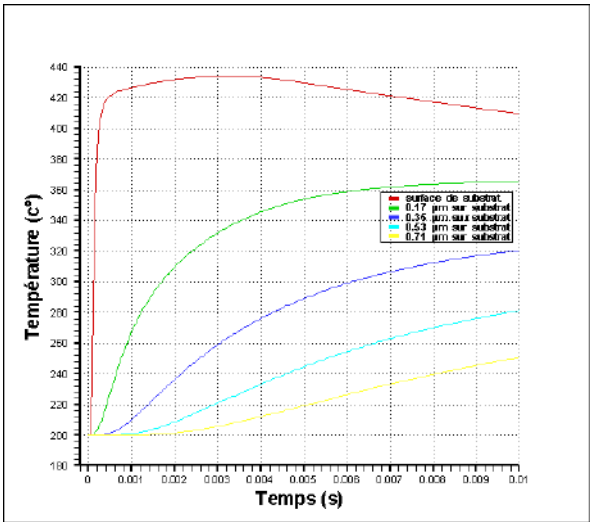


Figure IV-7-B-11 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

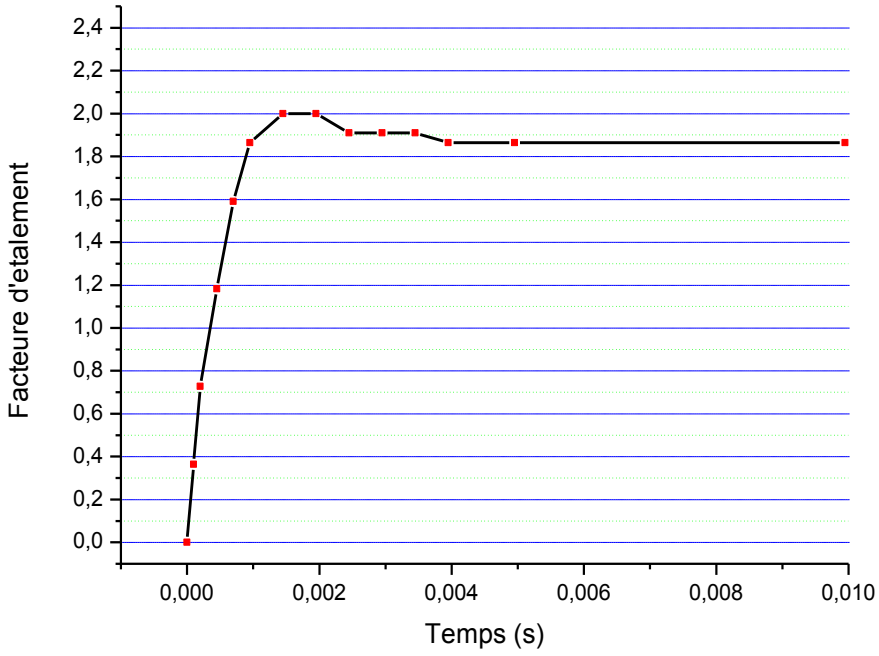


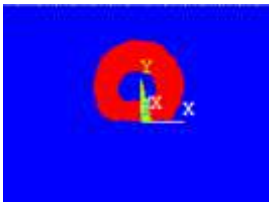
Figure IV-7-B-12 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

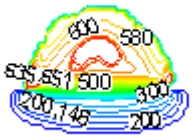
L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2 dons un T= 1,4ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (12°) :



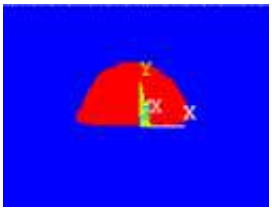
0.2ms

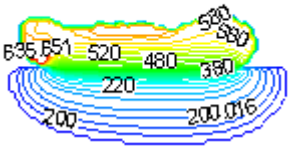




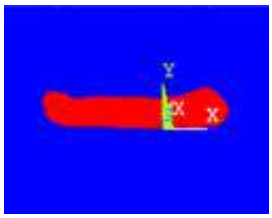
-

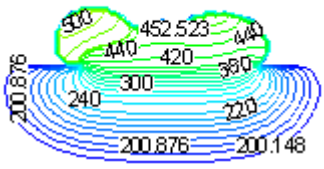
0.45ms





1.95ms





10ms

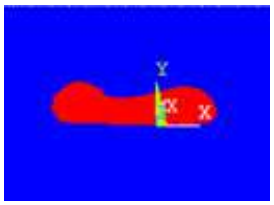


Figure IV-7-B-13 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

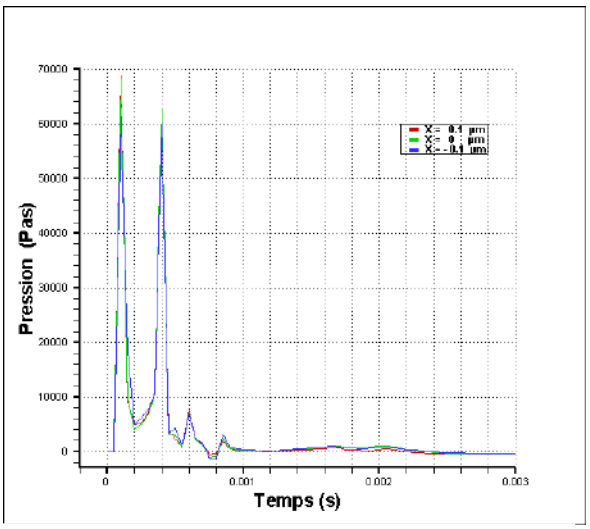


Figure IV-7-B-14 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

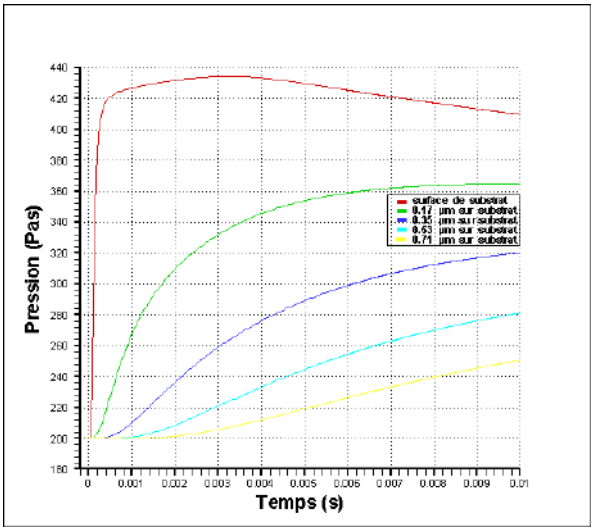


Figure IV-7-B-15 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

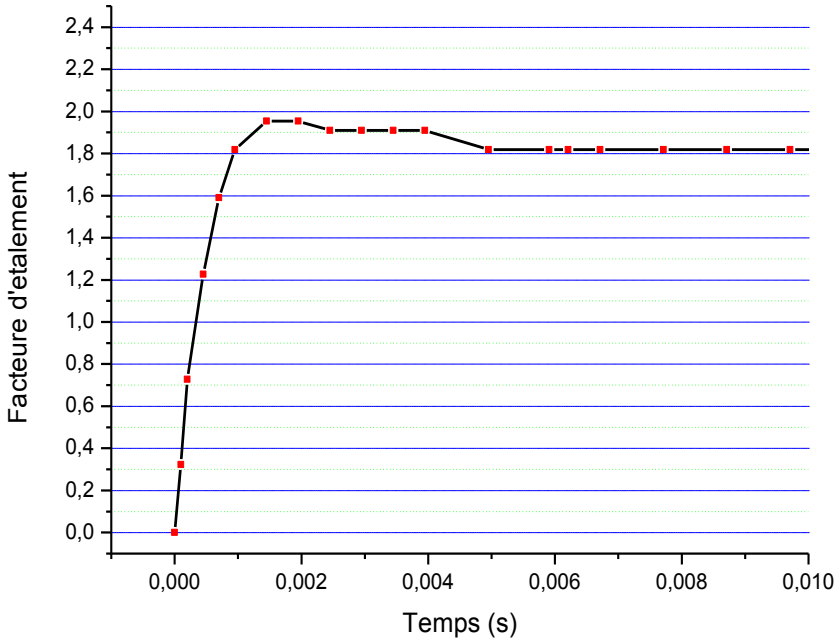


Figure IV-7-B-16 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2 dons un T= 1,4ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (15°) :

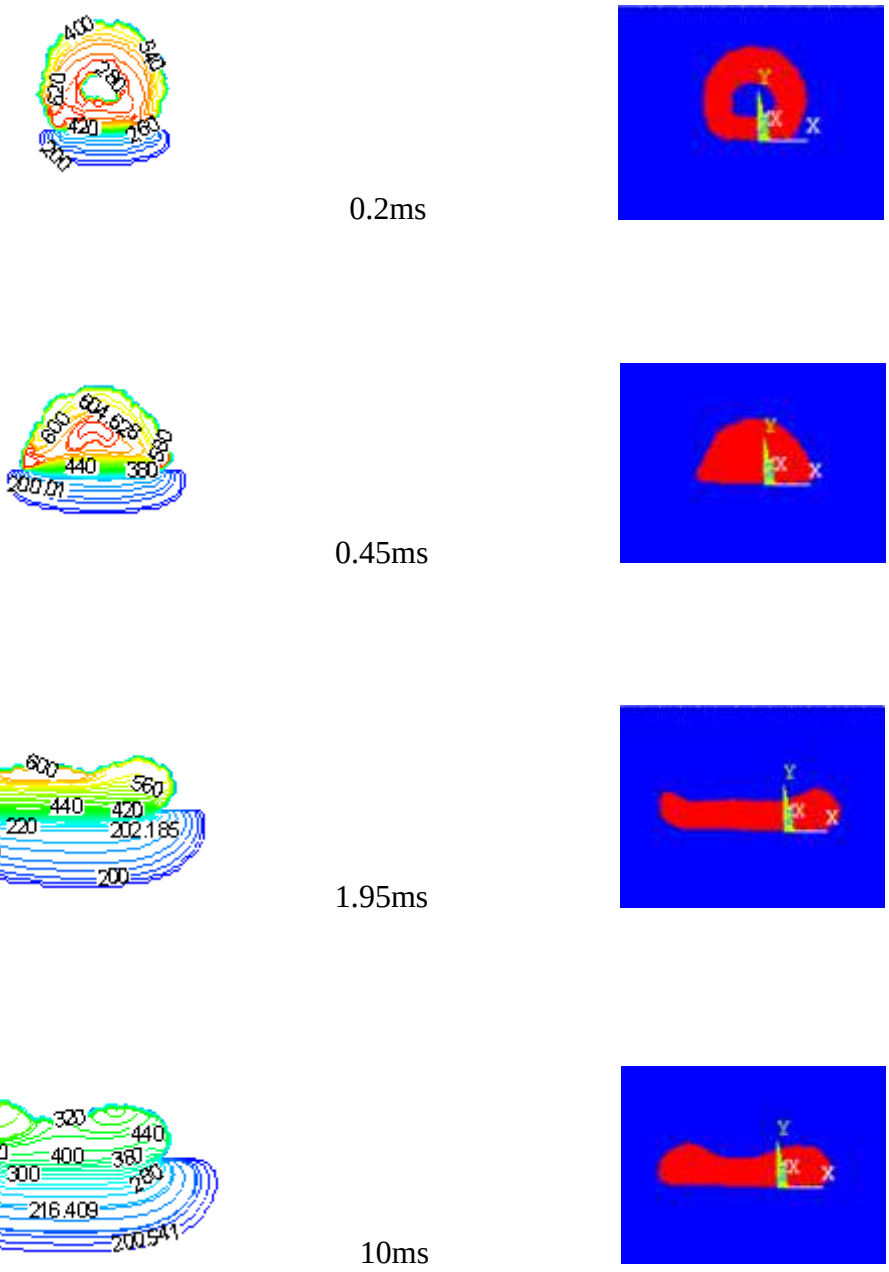


Figure IV-7-B-17 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

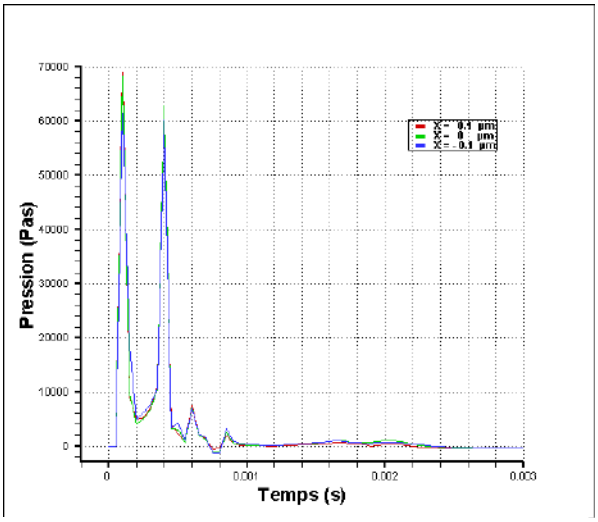


Figure IV-7-B-18 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

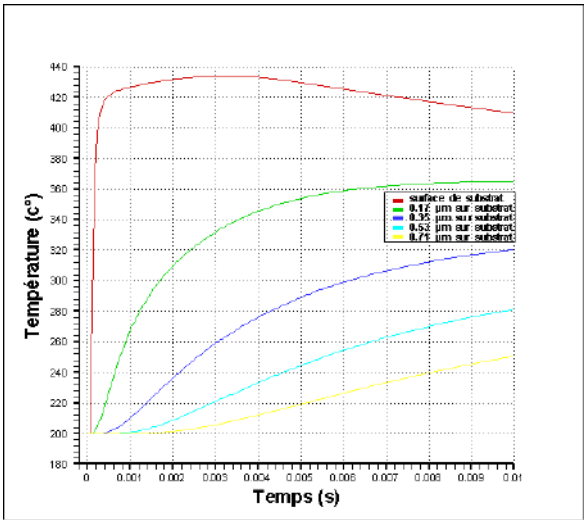


Figure IV-7-B-19 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

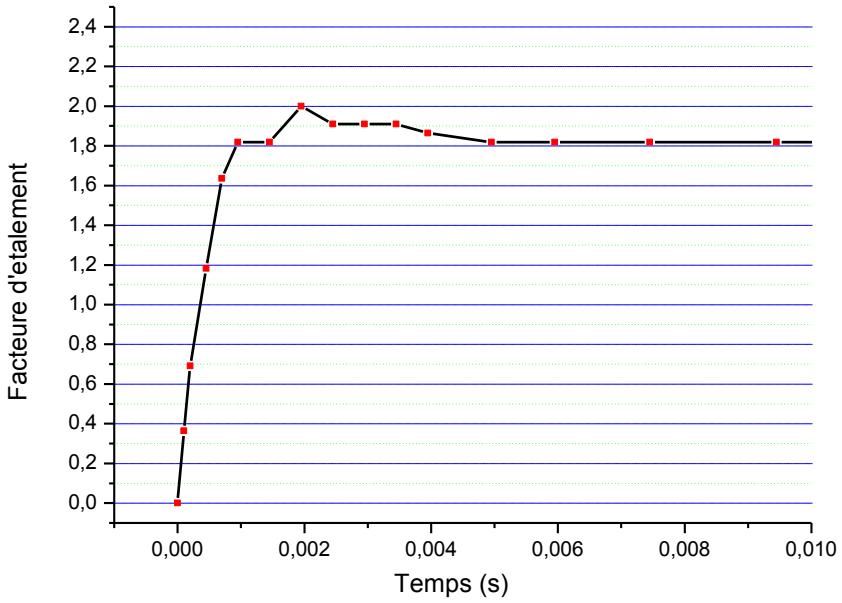


Figure IV-7-B-20 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 2 dons un T= 2ms, Finalement l'impact stabilise.

IV.9. Diamètre de vide d_0 = 75% de D_0:

La Figure IV-7-C-1 : représente pour chaque (α) la distribution de température pendant l'impact d'un gouttelette creuse a diamètre d_0= 75% de D_0 qui ont une température de 630 C° dans substrat à 200 C°. Ou 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.

Pour α = (0°) :

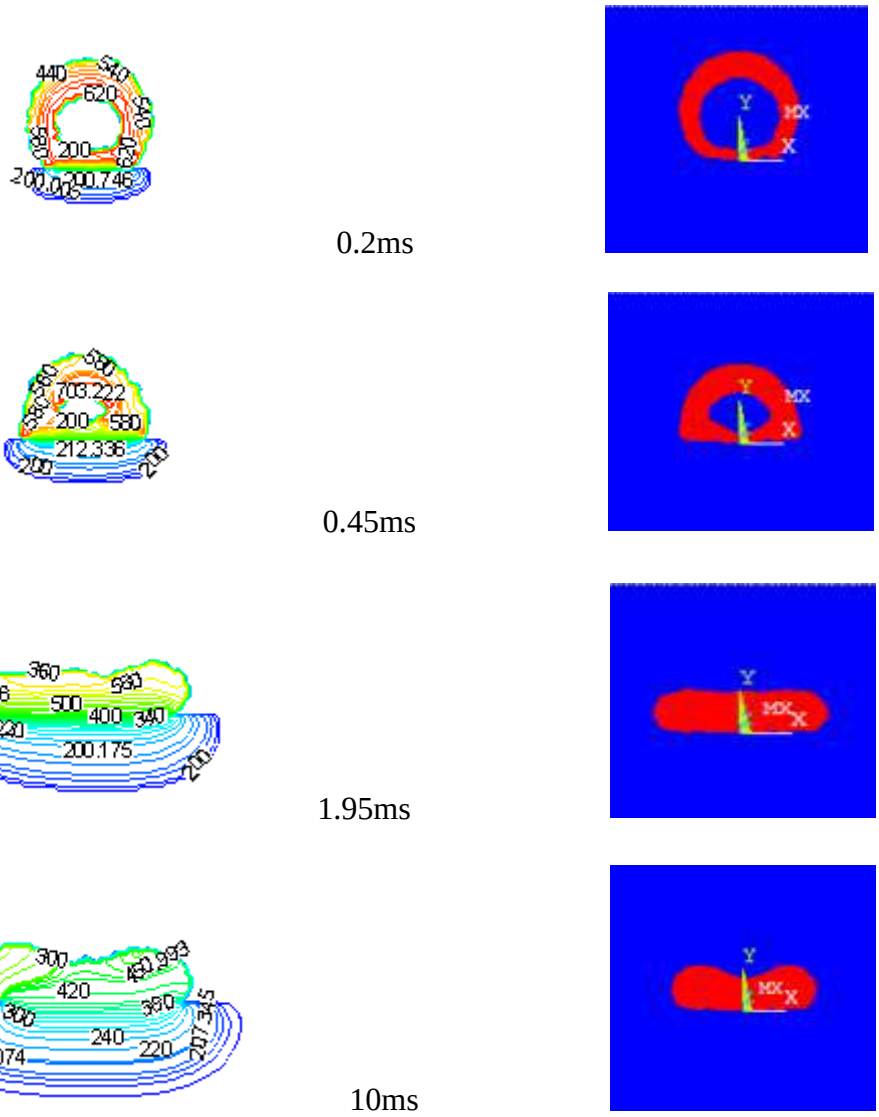


Figure IV-7-C-1 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

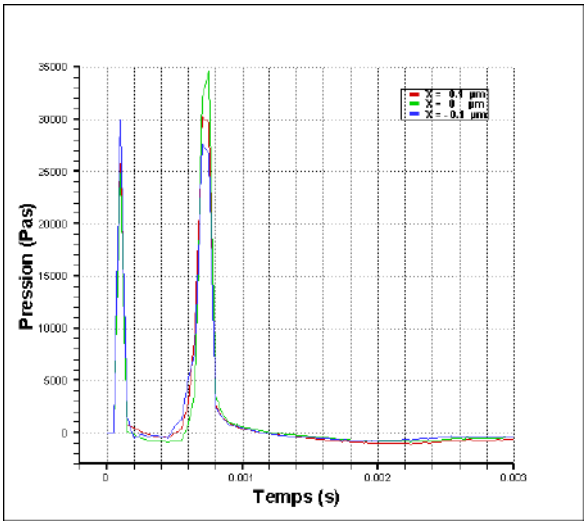


Figure IV-7-C-2 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

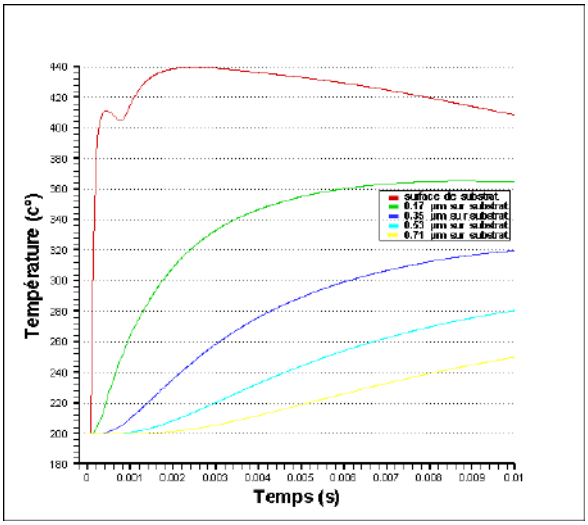


Figure IV-7-C-3 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

Après l'impact de la particule sur le substrat il y a toujours une variation de pression le long de substrat, la figure **IV-7-C-2** montre qu'a l'instant t=0.04ms la particule engendre une pression élevée sur le substrat, principalement sur le premier point d'impact particule / substrat et jusqu'à 34 500 (Pas), avec le temps cette pression se minimise jusqu'à ou elle devient nulle

La figure IV-7-C-3 montrent l'apparition des zones de bon et de mauvais contact a l'interface particule /substrat ce qui favorise le transfer de chaleur transversal vers le substret et nom pas radailement dans la lamelle cela explique la température quasi-constante en profondur du substrat.

On peut constater aussi que, aux premiers instants suivant le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement.

Alors : les graphes des températures ont les même résultats dans chaque(α).

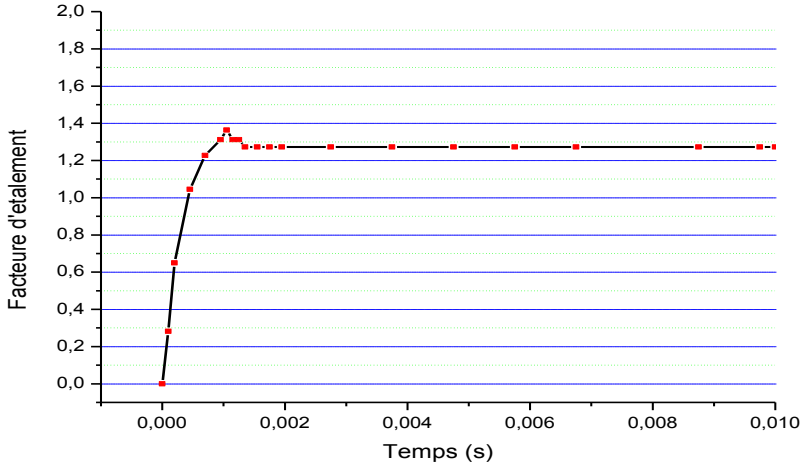


Figure IV-7-C-4 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 1,4 dons un T= 1ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (8°) :

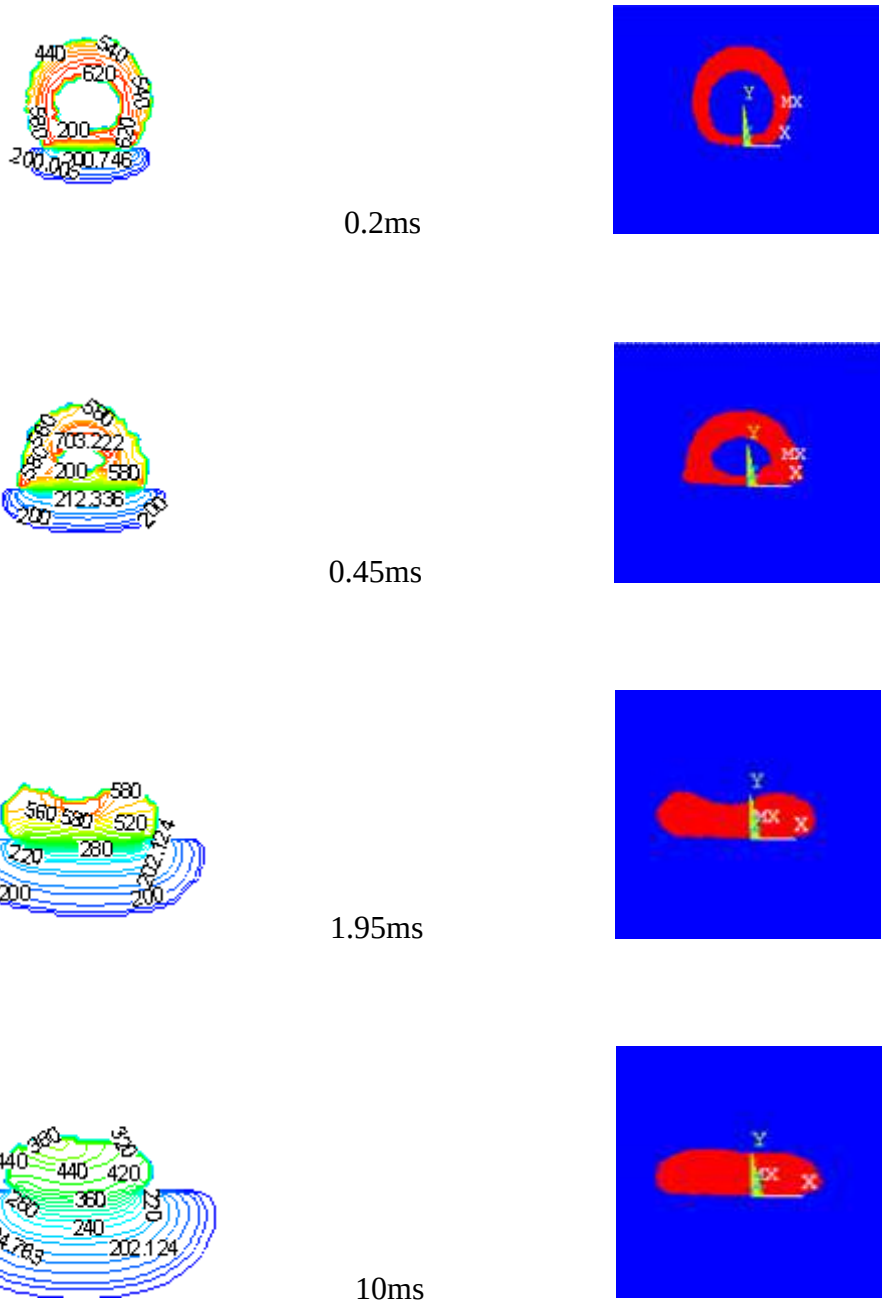


Figure IV-7-C-5 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

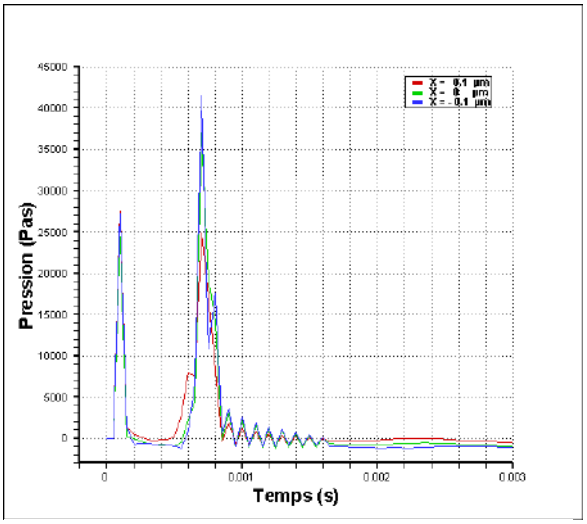


Figure IV-7-C-6 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

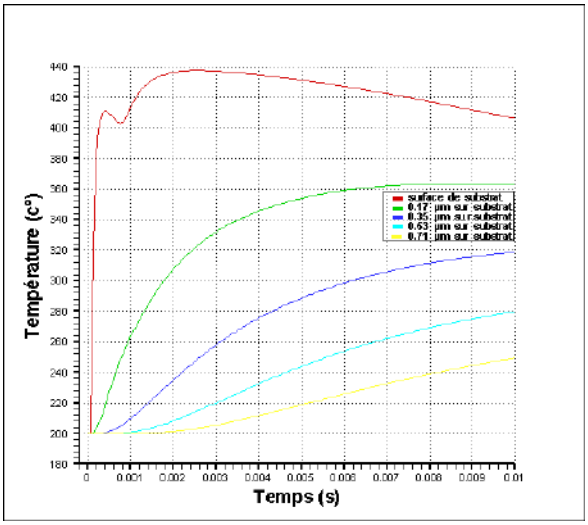


Figure IV-7-C-7 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

Après l'impact de la particule sur le substrat il y a toujours une variation de pression le long de substrat, la figure **IV-7-C-6** montre qu'a l'instant t=0.04ms la particule engendre une pression élevée sur le substrat, principalement sur le premier point d'impact particule / substrat et jusqu'à 42 000 (Pas), avec le temps cette pression se minimise jusqu'à ou elle devient nulle.

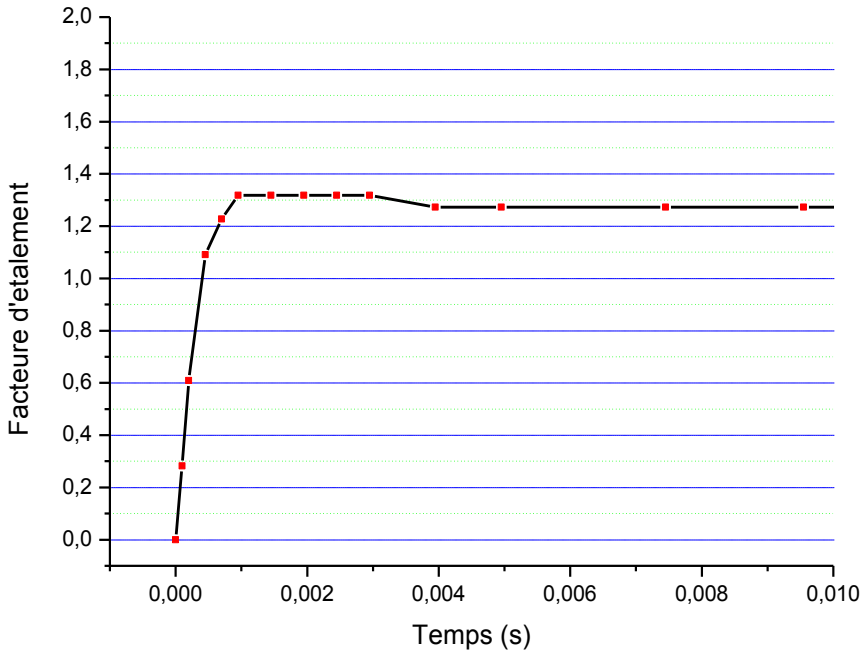


Figure IV-7-C-8 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 1,3 dons un T= 1ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (10°) :

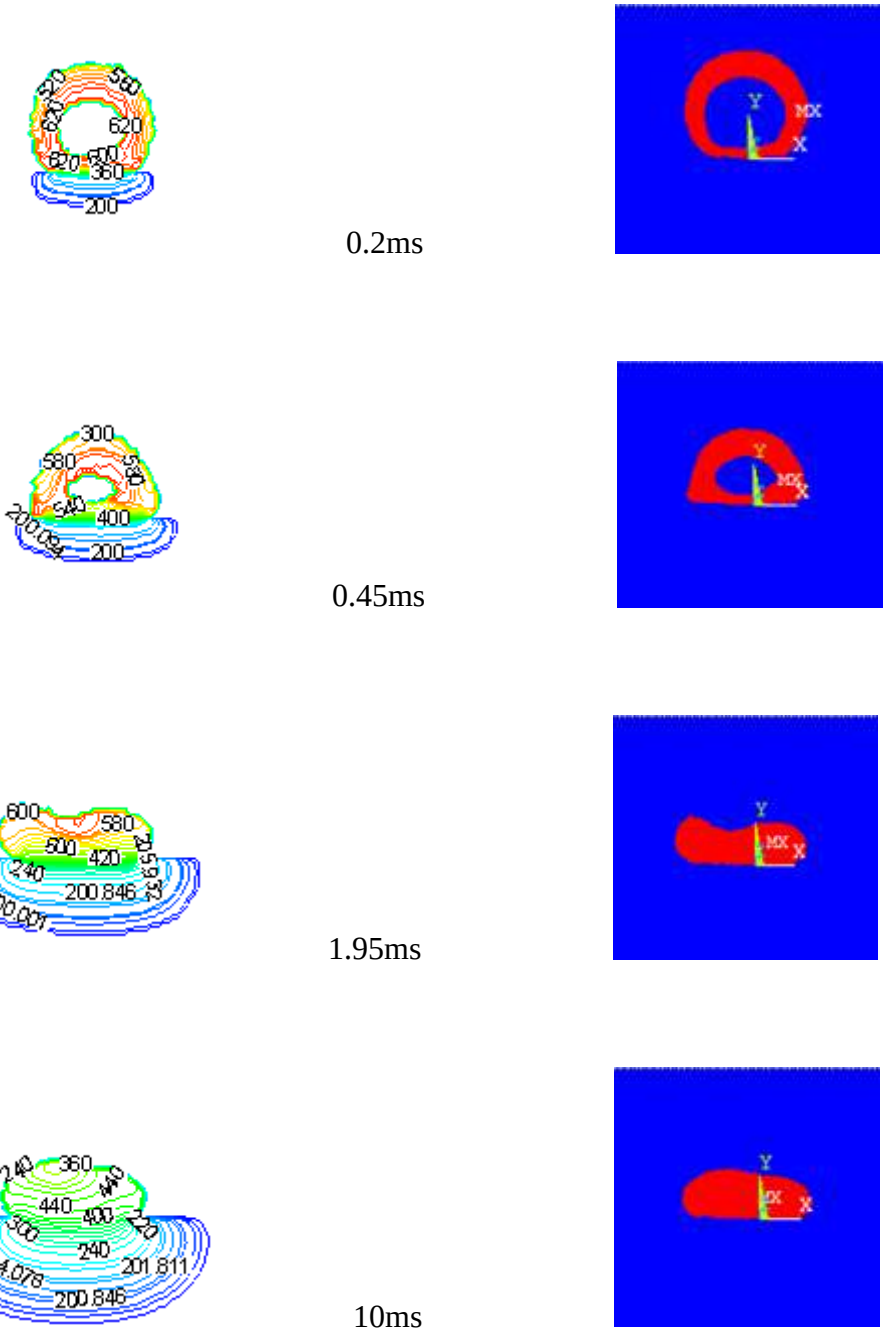


Figure IV-7-C-9 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

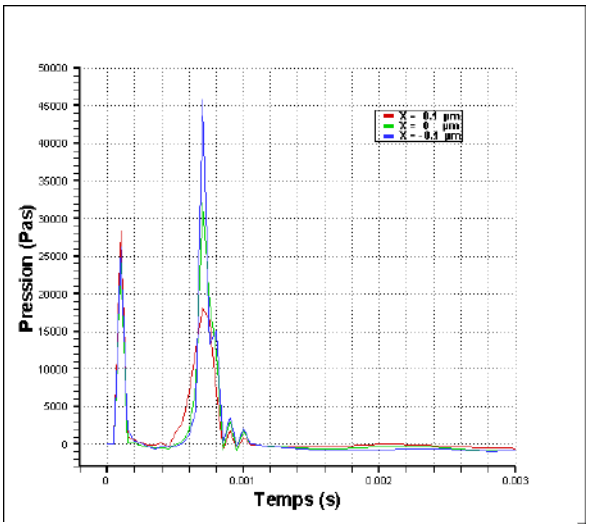


Figure IV-7-C-10 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

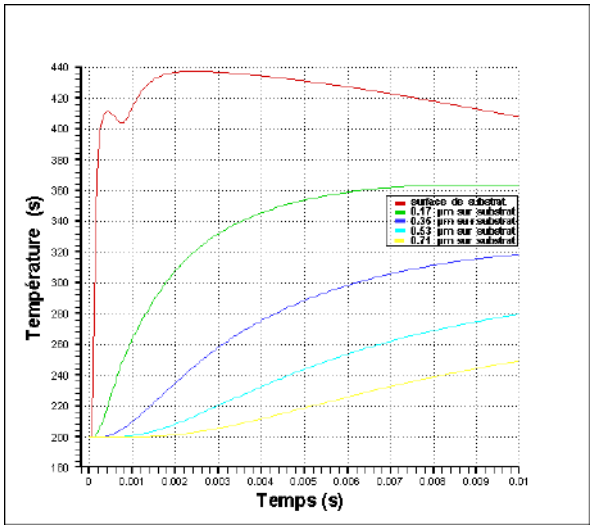


Figure IV-7-C-11 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

Après l'impact de la particule sur le substrat il y a toujours une variation de pression le long de substrat, la figure **IV-7-C-10** montre qu'a l'instant t=0.04ms la particule engendre une pression élevée sur le substrat, principalement sur le premier point d'impact particule / substrat et jusqu'à 46 000 (Pas), avec le temps cette pression se minimise jusqu'à ou elle devient nulle.

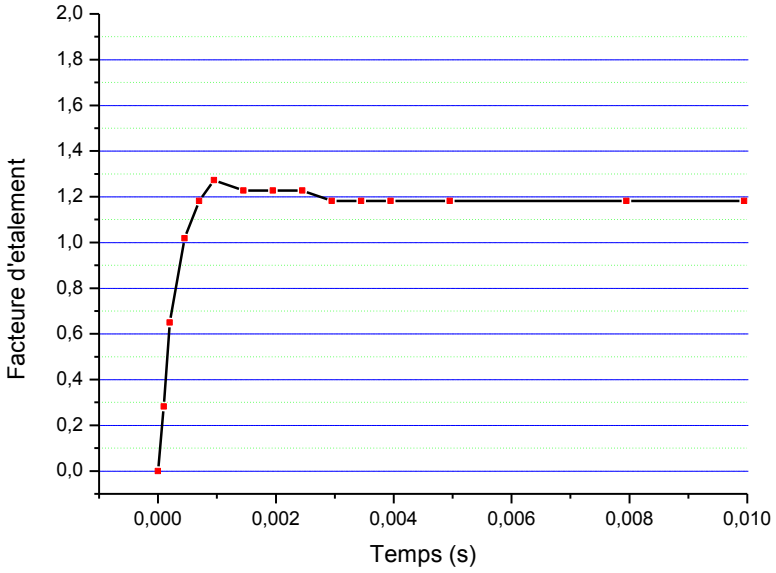


Figure IV-7-C-12 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 1,3 dons un T= 1ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (12) :

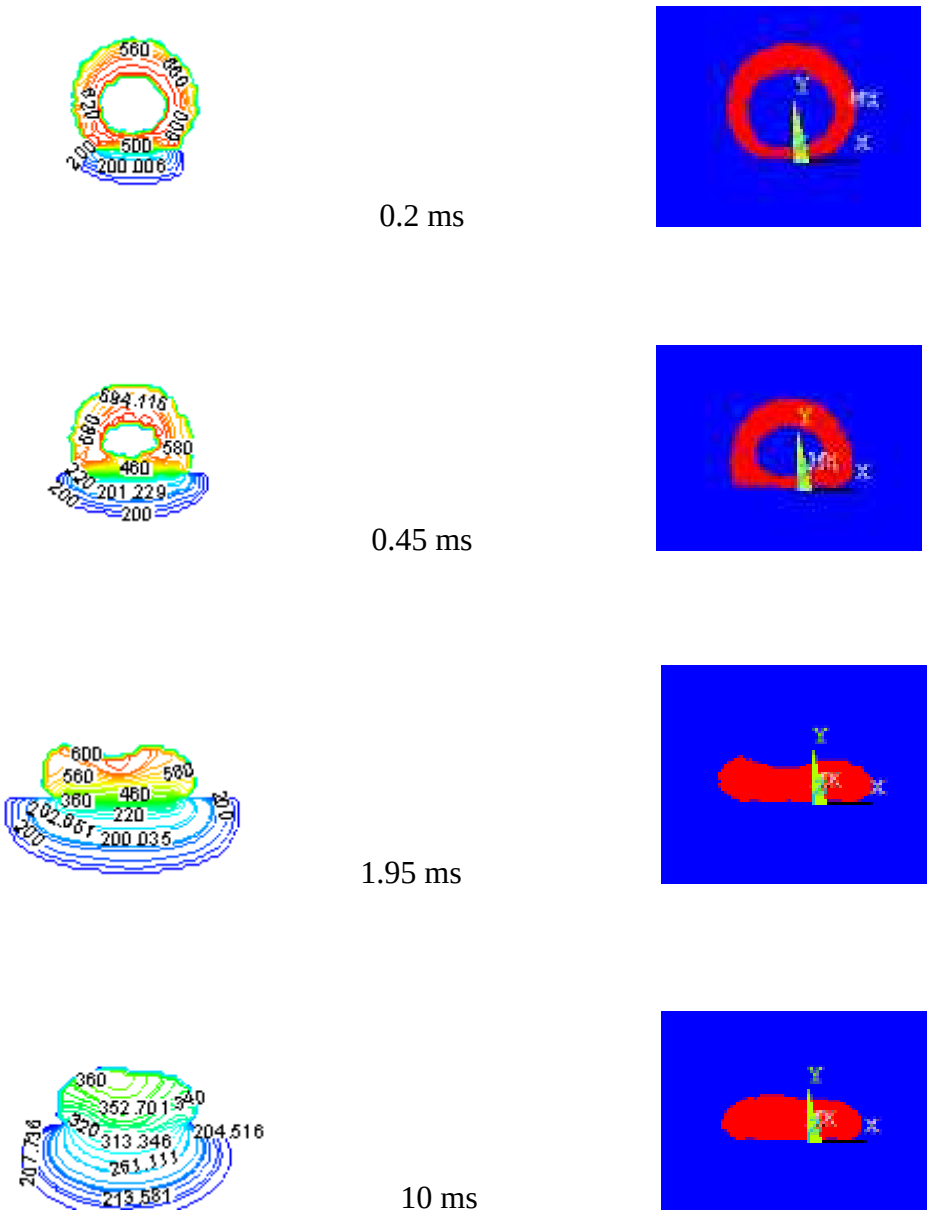


Figure IV-7-C-13 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

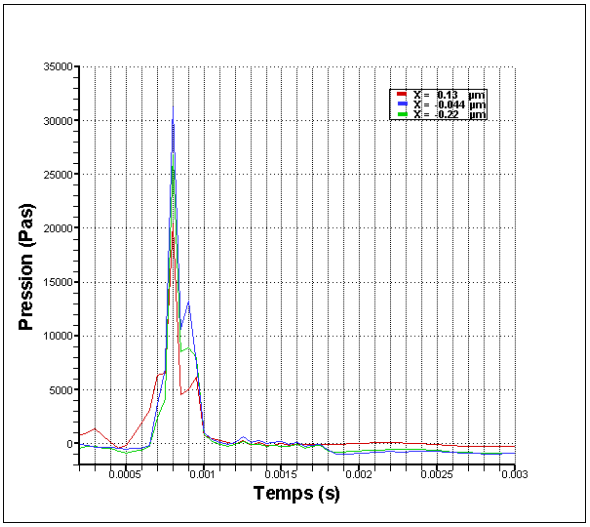


Figure IV-7-C-14 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

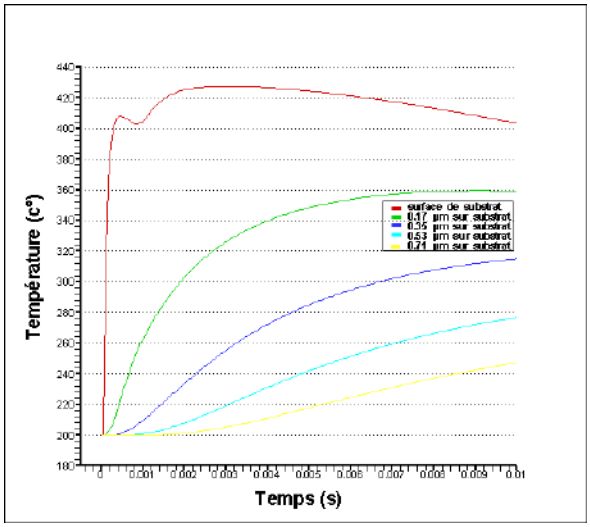


Figure IV-7-C-15 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

Après l'impact de la particule sur le substrat il y a toujours une variation de pression le long de substrat, la figure **IV-7-C-14** montre qu'a l'instant t=0.04ms la particule engendre une pression élevée sur le substrat, principalement sur le premier point d'impact particule / substrat et jusqu'à 31 500 (Pas), avec le temps cette pression se minimise jusqu'à ou elle devient nulle.

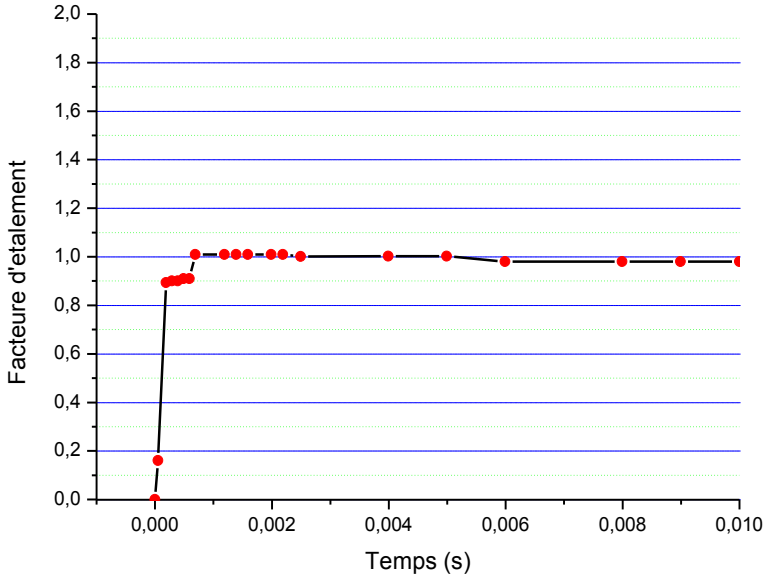


Figure IV-7-C-16 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 1 dons un T= 0,8ms, Finalement l'impact stabilise.

Pour α = (15) :

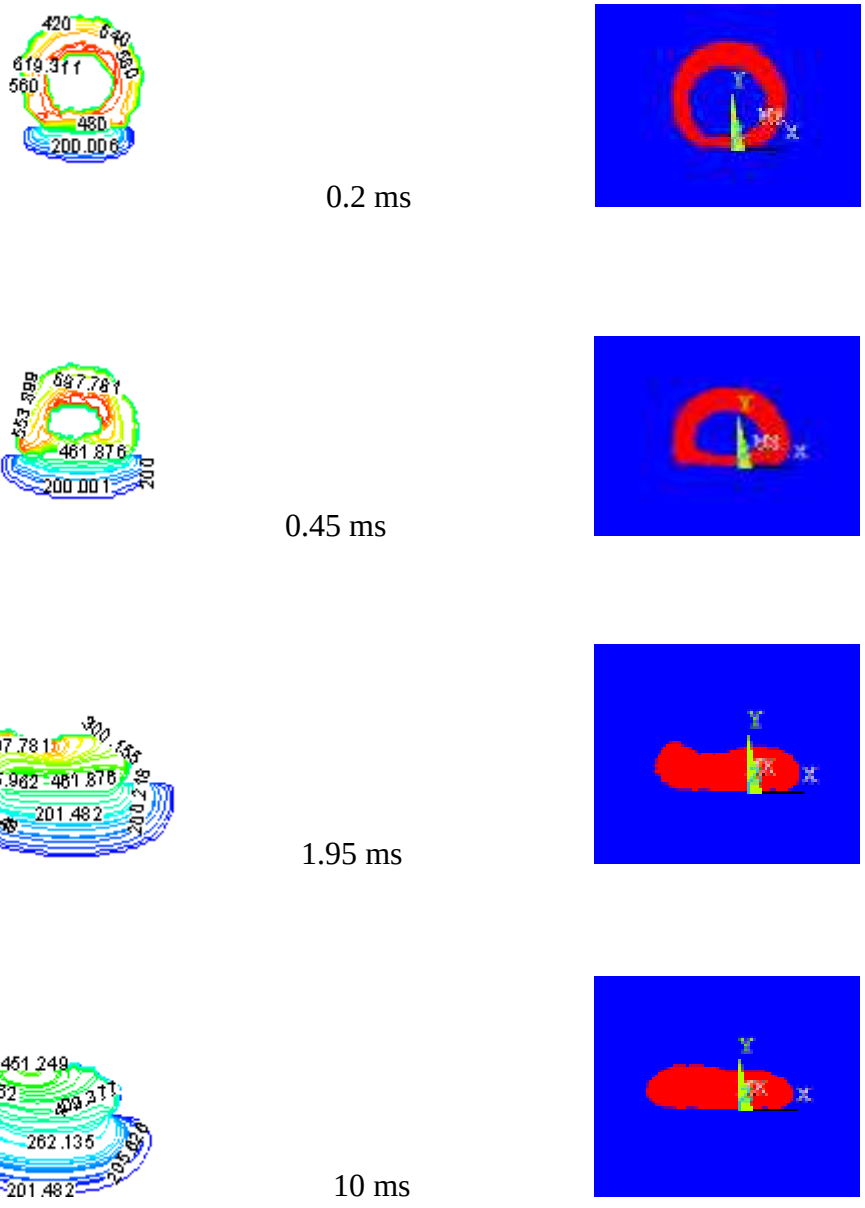


Figure IV-7-C-17 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium.

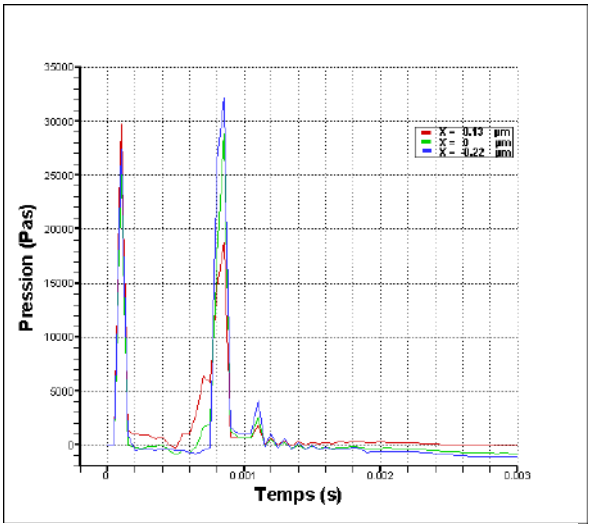


Figure IV-7-C-18 : la variation de la préssion d'impact pour trios point l'interface particule / substrat

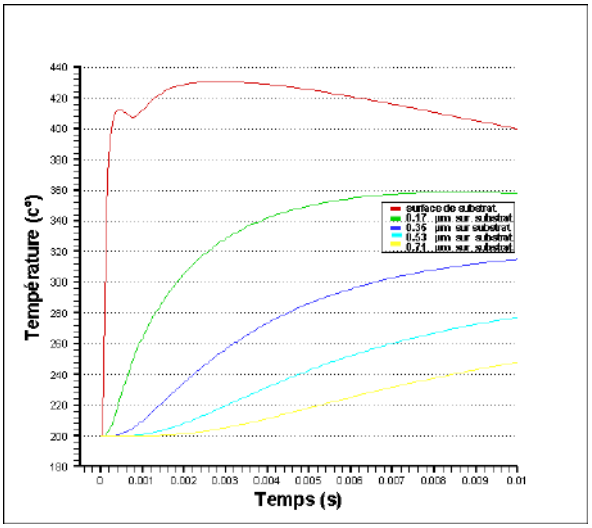


Figure IV-7-C-19 : profiles de température dans le temps poure cinq position dans substrat

Après l'impact de la particule sur le substrat il y a toujours une variation de pression le long de substrat, la figure IV-7-C-18 montre qu'a l'instant t=0.04ms la particule engendre une pression élevée sur le substrat, principalement sur le premier point d'impact particule / substrat et jusqu'à 32 200 (Pas), avec le temps cette pression se minimise jusqu'à ou elle devient nulle.

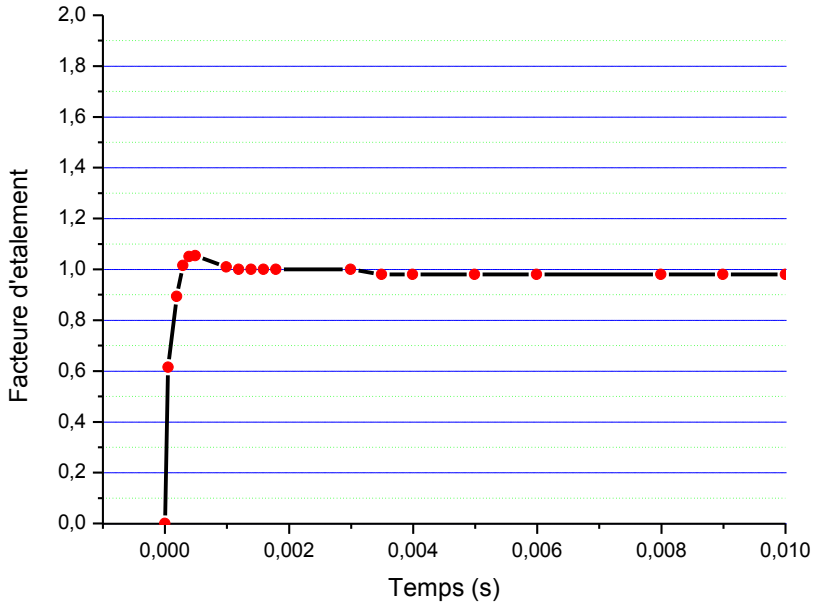


Figure IV-7-C-20 : Résultats de facture d'étalement pour la goutte.

L'étalement de la particule et le support jusqu'à la valeur 1,08 dons un T= 0,5ms, Finalement l'impact stabilise.

IV.10. Comparaison entre les trios gouttelette pour chaque (α):

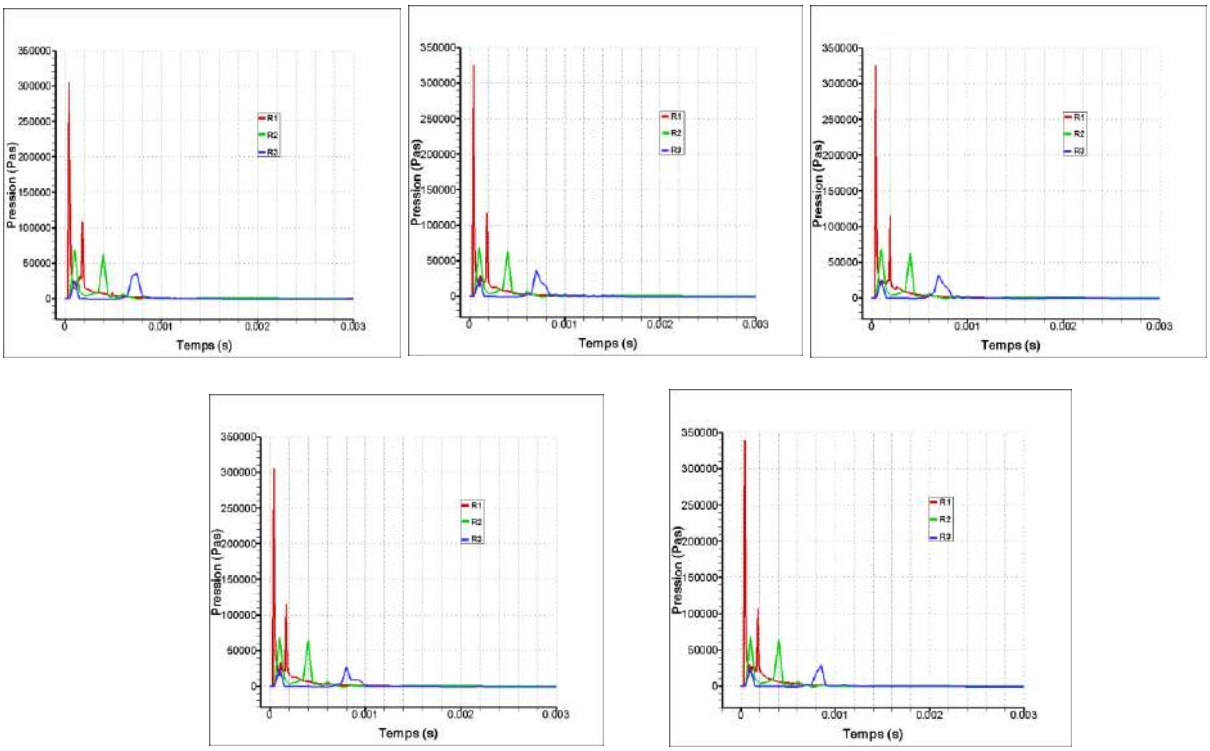


Figure IV-8 : la variation de la préssion d'impact au point de l'interface particule / substrat dans un trios cas de diamètre de vide de la goutte pour chaque (α).

La figure IV-8**.** illustre les distribution de la pression pour les trois cas au point d'impact au cours d'étalement de la goutte, initialement la pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une faible résistance de contact, d'où une bonne interaction goutte /substrat. La pression se désintégré vers zéro très rapidement. Il faut notre ici que, l'augmentation de pression à l'impact dans la forme (R1) est plus grande que celle dans (R2, R3), ce qui favorise de lamelle sur le substrat dans ce cas. cette différence de pression est influencée par le diamètre de vide ($\boldsymbol{d_0}$).

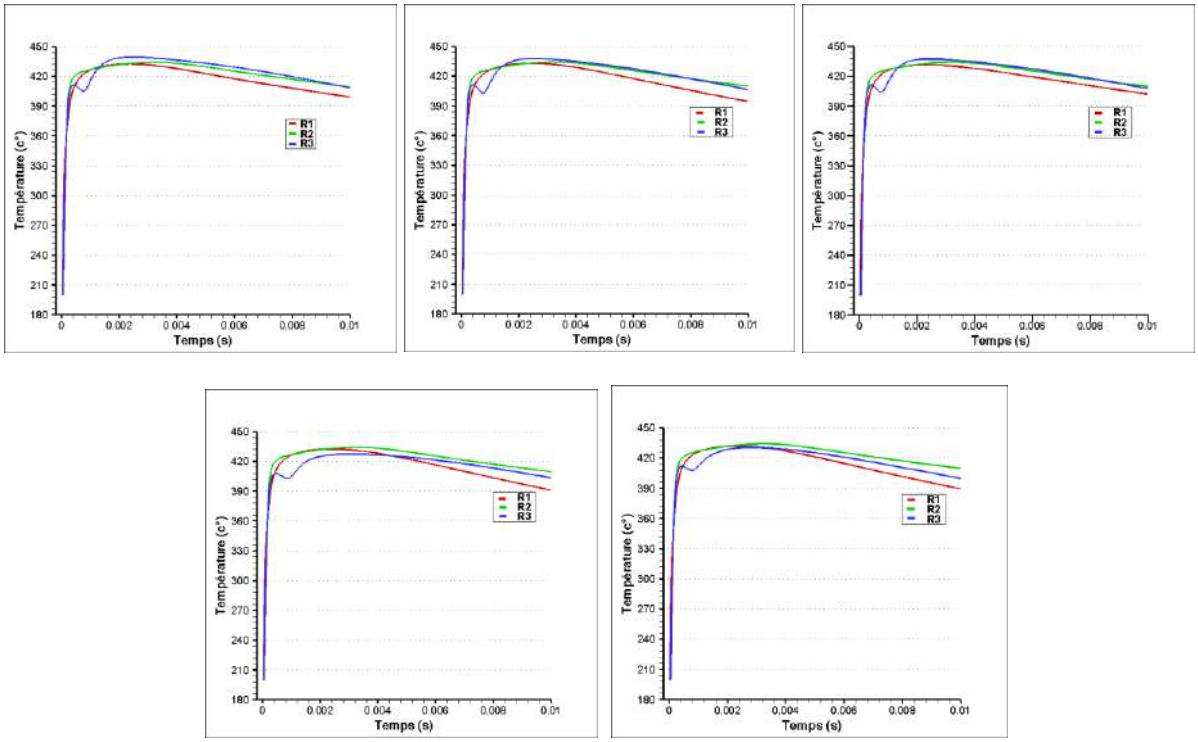


Figure IV-9 : Résultats de simulation pour les profils de température sur la surface de substrat dans trios goutte creuse a différant pour d_0 entre chaque (α)

.

La figure **IV-9** représente Les résultats numériques des profils de température dans le temps pour les trois cas de diamètre de vide au point de contact d'une goutte ou cours d'étalement, on note que le premier contact de la goutte avec le substrat, La température de la gouttelette creuse pour troisième cas augmente rapidement**,** suivie d'une gouttelette creuse du deuxième et premier cas, respectivement, pour ($\boldsymbol{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3}$).mais ($\boldsymbol{\alpha_4, \alpha_5}$), la valeur de température à troisième cas diminue pour le deuxième et premier cas.

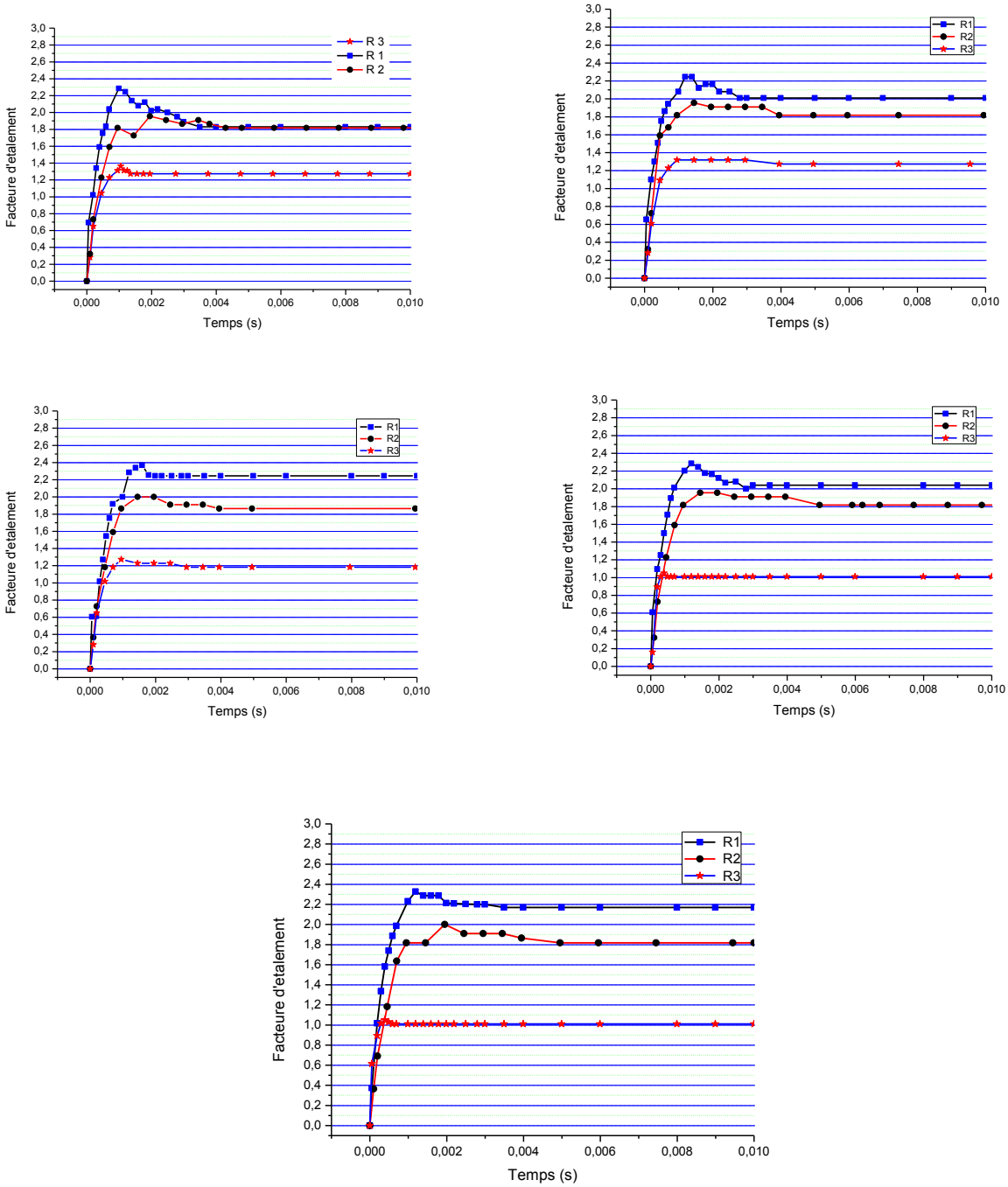


Figure IV.11. Comparaison entre les facteurs d'impact dans chaque (α) pour les trois cas.

L'étalement des gouttelettes pour chaque (α) au cours de l'impact pour les trois cas jusqu'à : T= (1,2 – 1,4) ms pour (R1),T=(1,4 – 2) ms pour (R2),et : T=(0,3 – 1) ms pour (R3). Les gouttes stabilises et prend la forme de l'étalement Final.

Les résultats numériques du modèle présenté sont proches dans les trois cas. Dans notre modèle, nous prenons en considération l'effet de la solidification sur les forces de viscosité avant l'étalement, qui sont corrigées après chaque pas de temps sous l'effet de transfert de chaleur dans la particule.

IV-11. Conclusion :

Cet d'étude en vous conclusion plusieurs point et les caractéristique important qui influencé sur l'étalement et la solidification, refroidissement de gouttelette creux 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 cas, la pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une bonne d'adhérence entre de goutte /substrat
  Alors la pression d'impact des particules est liée à l'adhérence à la paroi, et la pression est influencée par le diamètre de vide, contre l'angle d'impact (impact oblique) n'est pas influant sur la pression.

- La formation de lamelle dans le premier cas ($R1$) est bien étalée, donc le diamètre de vide et l'angle d'impact (impact oblique) joue un rôle important sur la formation de lamelle.
- l'angle d'impact et la pression, n'influe pas sur la resolidification el qui est liée au transfert de chaleur entre lamelle / substrat.

Conclusion générale

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

Expérimentalement en raison des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la microseconde et du micromètre.il est donc nécessaire de faire appel à des outils numériques complexes pour prendre en compte les divers aspects thermiques et dynamiques.

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

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

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

Les résultats numériques ont montré que la forme de la goutte joue un rôle important pour son étalement. Et l'angle d'impact (impact oblique) a une influence plus importante.

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

LES REFERENCES

[1] Michel Vardelle, Contribution au développement d'un procédé de projection dynamique à froid (P.D.F.) pour la réalisation de dépôts de nickel Le 17 octobre 2005 .François RALETZ

[2] Proner A., Revêtements par projection thermique, Techniques de l'ingénieur, Traité matériaux métalliques, M 1 645, pp 1-20; et Fauchais P., Vardelle A. Dussoubs B., Quo Vadis Thermal Spraying? Thermal Spray Technology, Vol.10 (1), pp. 44-66, 2001.

[3] S. NOUROUZI, "Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive", thèse de l'Université de Limoges, 2004.

[4] Asif Ansar Syed, Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc. Thèse de l'université de Limoges N° d'ordre 3-2004 (2004)

[5] H. Singh, B. S. Sidhu, D. Puri, S. Prakash, Use of plasma spray technology for deposition of high temperature oxidation/corrosion resistant coatings – a review, Materials and Corrosion

[6] source : www.advanced.ceating.com.

[7] Mohamed Bouneder : Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les poudres composites métal/céramique en projection thermique : Application à la projection par plasma d'arc soufflé argon hydrogène 2006

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

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

[10] 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.

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

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

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

[14] 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.

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

[16] 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.

[17] Mohamed Bouneder : Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les poudres composites métal/céramique en projection thermique : Application à la projection par plasma d'arc soufflé argon hydrogène 2006

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

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

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

[21] Minxia Xue, Yoav Heichal, Sanjeev Chandra, Javad Mostaghimi Modeling the impact of a molten metal droplet on a solid surface using variable interfacial thermal contact resistance 2006

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

[23] 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.

[24] Menard, D. Lapierre, R. Kearney, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Temperature measurement of a d.c. plasma torch plume by Rayleigh light scattering, in Proc. of the International Symposium on Plasma Chemistry, 1993, pp 338-343.

[25] Babaei R., Abdollahi J., Homayonifar P., Varahram N., Davami P. « Improved advection algorithm of computational modeling of free surface flow using structured grids» Computer Methods in applied Mechanics and Engineering, vol.195, 2006, pp.775–795.

[26] 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.

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

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

LES REFERENCES

[29] F. Ben Ettouil, B. Pateyron, H Ageorges, M.El Ganaoui, P. Fauchais, O.Mazhorova Fast modeling of pahse change in a particle injected within a.d.c.plasma jet J. thermal Spray technology, 16,2007,744-750.

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

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

[32] 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.

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

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

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

[36] 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

[37] 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

[38] L. Ait moudid «Couplage Fluide-Structure pour la simulation numérique des Écoulements fluides dans une conduite `à parois rigides ou élastiques, en présence d'obstacles ou non ». Thèse de doctorat à L'Université d'Artois. 2007

[39] 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.

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

[41] 378 J. Madejski, Solidification of droplets on a cold surface, Int. J. Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp 1009- 1013.

[42] Arvind Kumar, Sai Gu*: Modeling impingement of hollow metal droplets onto a flat surface, International Journal of Heat and Fluid Flow 37 (2012) 189–195.