République Algérienne Démocratique & Populaire

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

Faculté de technologie

Département de génie mécanique

Projet fin d‟étude pour l‟obtention du diplôme de master En Génie Mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

Thème

L’impact successif des particules d’alumine creus sur substrat d’acier

Présenter par :

- SALHI ammar
- REMEL azzeddine

proposé et dirigé par :

Dr : Mounir ZIRARI

2016/2017

Remerciements

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guider vers le droit chemin, de nous avoir aidées poursuivre nos études et de choisir un métier aussi noble.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à Dr. BOUMAHDI Mouloud pour l'aide précieuse qu'il nous apporté tout au long de la préparation de ce mémoire aussi pour les conseils qu'il n'a pas cessé de nous prodiguer.

Nous adressons également nos vifs remerciements et notre profonde gratitude :
Au président et aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font, en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous remercions aussi tous les professeurs et les membres d'encadrement qui nous ont soutenu durant notre formation et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

À ma grande famille

À ma très chère mère.

À mon cher frère : Mohamed

À mes Chères sœurs.

À tous mes amis.

À mon collègue et binôme Ammar et sa famille

À tous mes enseignants depuis mon premier pas dans l'école

À tous ceux et celles que j'aime.

À tous mes camarades de la promotion 2017

Azzeddine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

À ma grande famille

À ma très chère mère.

À tous mes frère :

À mes Chères sœurs.

À tous mes amis.

À mon collègue et binôme Azzeddine et sa famille

À tous mes enseignants depuis mon premier pas dans l'école

À tous ceux et celles que j'aime.

À tous mes camarades de la promotion 2017

Ammar

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RÉSUMÉ

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Organigramme de la projection thermique : 2
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 : 4
I.2.1.3 La projection supersonique par combustion : 5
I.2.1.4 Le canon à détonation : 5
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 Définition : 8
I.3.2Plasma conventionnel : 8
I.3.3Plasma de vide : 8
I.4.Matériaux d'apport : 9
I.5.Substrats : 9
I.6.Préparation de substrat : 9
I.7.Ecrasement des particules sur le substrat : 10
I.8.Construction du dépôt : 10
I.9.Etalement de la particule : 10
I.10.La solidification des lamelles : 11
I.11.Formation du dépôt : 11
I.12.Solidification et refroidissement des particules : 12

I.13.L'état de l'art : 12

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE :

II.1. Introduction : 14
II.2. Modèle dynamique : 14
II.2.1. Equation de continuité : 14
II.2.2. Equation de quantité de mouvement : 15
II.2.3. Équation de l'énergie : 15
II.3. Modèle thermique : 15
II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase : 15
II.3.1.1. Méthode à grille mobile : 16
II.31.2. Méthode à grille fixe : 17
II.3.1.2.1. Méthode d'enthalpie : 17
II.3.1.2.2. Méthode de la chaleur spécifique équivalente : 17
II.3.2. Modèle thermique utilisé : 19
II.4.Calcul d'interfaces : 19
II.4.1. Les méthodes de suivi de front : 21
II.4.2. Les méthodes de suivi de volume : 21
II.4.3. La Méthode VOF CIAM : 22
II.5. Conclusion : 24

CHAPITRE III : FORMULATION NUMERIQUE

III.1. Introduction : 25
III.2.Les méthodes numérique 25
III.2.1.méthode des différences finies 25
III.2.2.méthode des éléments finis 25
III.2.3.méthode des volumes finis 25
III.3.Résolution des équations par éléments finis : 26
III.3.1. Méthodes des éléments finis : 26
III.3.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis : 27
III.3.2.1. Formulation variation elle forte : 27

III.3.2.2. Formulation variationelle faible : 27
III.3.3. Forme généralisée des équations du système et discrétisation : 28
III.3.3.1. Terme temporelle : 29
III.3.3.2. Terme d'advection : 31
III.3.3.2.1. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU)……..31
III.3.3.2.2. Method SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)……..32
III.3.3.2.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)……33
III.3.3.3. Terme de Diffusion : 34
III.3.3.4. Termes source : 34
III.4. Conclusion : 35

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction : 36
IV.2. ANSYS : 36
IV.2. 1.Les points forts des outils ANSYS sont : 36
IV.2.2.Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux : 37
IV.2.3.Schéma de logiciel ANSYS : 38
IV.3. Matériaux utilisé : 39
IV.3.1. L'aluminium : 39
IV.4 .Identification : 41
IV.4.1. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue : 41
IV.5 .Description du domaine d'application : 48
IV.5.1.Premier cas 0 % d'air : 48
IV.5.2.Deuxième cas 25 % d'air : 51
IV.5.3.Troisième cas 50 % d'air : 54
IV.5.4.Quatrième cas 75 % d'air : 57
IV.5.5.Comparaison entre les 4 cas : 60
IV.6.Conclusion : 66

CONCLUTION GENERALE : 67

REFERENCES

Résumé :

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur pour fondre et accélérer un matériau celui-ci prend alors la forme particules pâteuses ou liquides qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilement successifs. Les interactions entre phase solides et liquides et entre gouttes qui s'écrasent simultanément sur la surface solide l'une à côté de l'autre ou bien l'une après l'autre posent question, par ce qu'elles modifient la morphologie d'impact évaluée pour une goutte isolée. L'observation en l'interprétation expérimentale des phénomènes difficiles à contrôler et à maitriser, se compliquent encore lorsque l'impact est relatif plusieurs gouttes simultanées en présence de goutte creuse, par ce projet de fin d'étude on a étudié numériquement l'interaction pendant l'étalement des particules pleine et creuse qui s'écrasent successivement sur substrat ;on a trouvé que lorsque le pourcentage d'air dans la particule est supérieur à 50% la dynamique de l'étalement est dégradé.

Mots clés :

Dépôt, lamelle, particule creuse, successif, substrat, VOF, changement de phase, chaleur spécifique équivalente, éléments finis, Simulation numérique, ANSYS.

الملخص :

الرش الحراري يعتمد أساسا على مصدر الحرارة لإذابة وتسريع المعدن و هذا يؤدي الى أخذ جزيئات صلبة او سائلة، حيث تقوم بالانتشار و التصلب في حالة الاصطدام بالركيزة ومن خلال هذا يتشكل لنا كومة من المعدن. التفاعلات الناتجة بين المرحلة الصلبة ، السائلة و بين القطرات تؤدي الى تشويه القطرات مع السطح الصلب في وقت واحد، واحد بجانب آخر، واحد تلو آخر مما يؤدي الى طرح تساؤلات، وهذا راجع الى تغيير مورفولوجيا القطرة

في تفسير تجربة لهذه الظواهر يصعب التحكم فيها و اكثر تعقيدا في حالة استعمال عدة قطرات جوفاء .

في هذه المشروع نقترح الدراسة العددية التفاعل اثناء انتشار قطرات جوفاء على الركيزة، حيث وجدنا بانه عندما تفوق نسبة الهواء داخل القطرة اكثر من 50 ف المئة ديناميكية التمدد تتناقص.

الكلمات المفتاحية :

الايداع ،صفيحة ،قطرات جوفاء، الركيزة، تغيير الحالة، الحرارة النوعية المعتدلة، العناصر المتناهية، المحاكات الرقمية ،

ANSYS , VOF

Summary :

Thermal spraying consists in using a heat source to melt and accelerate a material, which then takes the form of pasty or liquid particles which strike, spread and solidify on a substrate, forming a deposit by successive stacking. The interactions between solid and liquid phases and between drops which simultaneously collapse on the solid surface side by side or one after the other pose a question, by modifying the morphology of a liquid, Impact evaluated for an isolated drop. The observation in the experimental interpretation of the phenomena difficult to control and to master, are complicated still when the impact is relative several simultaneous drops in the presence of hollow drop, by this project of end of study we studied numerically the interaction During the spreading of the solid and hollow particles which are successively crushed onto the substrate, it has been found that when the percentage of air in the particle is greater than 50%, the spreading dynamics is degraded.

Keywords :

Deposit, lamella, hollow particle, successive, substrate, VOF, phase change, equivalent specific heat, finite elements, Numerical simulation, ANSYS.

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

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

Figure I.3: schéma du procédé HVOF[6]..... 5

Figure I-4 : schéma du procédé canon a détonation[7]..... 6

Figure I-5 : schéma du procédé arc fil[7]..... 7

Figure I-6 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé[8]..... 8

Figure I-8 : Mécanisme d'étalement des lamelles [27]..... 11

Figure II.1 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température [48]..... 17

Figure II.2 : Présentation des méthodes de calcul d'interface..... 19

Figure II.3 : Différentes méthodes de suivi de front 21

Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [51,52]. 21

Figure II.5 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret [53] .....…22

Figure III.1 : Approche de ligne de courant d'Upwind [60]……..31

Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS..... 38

Figure IV. 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification. 41

Figure IV.3 : représente les étapes de la dynamique d'étalements et la variation de température pour chaque temps..... 43

Figure IV.4 F acteur d'étalement 43

Figure IV.5 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32mm de diamètre, à 200°C avec une vitesse de 3m/s le temps d'étalement t=7ms c'est bon résultat. 45

Figure IV.6 : point de pression de notre choix 46

Figure IV.7: la variation de la pression au point d'impact 46

Figure IV.8 : Positions des points de notre choix 47

Figure IV.9 : profiles de température en fonction de temps pour cinque position 47

Figure IV.10: profiles de température avec le temps premier cas 47

Figure IV.11: la variation de la pression au point d'impact pour le premier cas 50

Figure IV.12 : profiles de température avec le temps dans le deuxième cas 52

La figure IV.13 illustre les distributions de la pression le long de substrat au cours de l'étalement de la goutte. 53

Figure IV.14 : profiles de température avec le temps dans le Troisième cas 55

Figure IV.15:la variation de la pression au point d'impact Pour le Troisième cas 56

Figure IV.16 : profiles de température avec le temps dans le quatrième cas 58
Figure IV.17 : la variation de la pression au point d'impact Pour le quatrième cas 59

Figure IV.18 : Comparaison entre les profils de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas. 64

Figure IV.19: Comparaison de la variation de la pression au point d'impact Pour les quatre cas. 65

Tableau III.1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables [60]..... 29

Tableau IV.1 : propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. [61] ... 40

Tableau IV.2 : distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C 48

Tableau IV .3:distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C 51

Tableau IV.4: distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C 54

Tableau IV .5: distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C 57

Tableau IV.6 : Comparaison des profils de température des quatre cas :..... 60

Tableau IV.7 : représentation spatial de la dynamique d'étalement pour les quatre cas étudiés 62

A : l'aire de la particule perpendiculaire à l'écoulement……..m^2

B : surface d'échange……..m^2

CD: Le coefficient de traînée

Cds: Coefficient d'émission de la surface (Cds= 1 pour un corps noir Cds<<1 corps brillant)

Cp : La chaleur spécifique……J. $Kg^{-1}.K^{-1}$

C: Coefficient d'advection transitoire.

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

dt: Temps élémentaire en……...s

dp: Le diamètre de la particule……...m

dp: Le diamètre de la particule……..m

dt/dx: Gradient de température en x en……..$K.m^{-1}$

dQ: Énergie élémentaire en……J

E : l'émissivité de la particule

FD: La force de traînée exercée par le fluide sur la particule……N

h : le coefficient de transfert thermique……$W.m^{-2}.K^{-1}$

h: longueur d'élément le long de la direction d'advection…….m

$\overline{K}$ **:** La conductivité moyenne intégrée……..$W.m^{-1}.\ k^{-1}$

K : Nombre de Sommerfeld à l'impact

Kf: Paramètre de splashing d'étalement

Kth: La conductivité thermique……....$W\ .m^{-1}.k^{-1}$

Kn: Le nombre de Knudsen,

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

Nu : le nombre de Nusselt

P : La masse volumique du fluide …….$kg.m^{-3}$

Pr: Le nombre adimensionnel de Prandtl (de l'ordre de 0,5 à1).

Re: Nombre de reynolds

SΦ: Termes source.

Tp: La température du plasma loin de la particule……...K^{-1}

Ts : La température de la particule……k

tS: Température de surface du corps……k

T∞ : La température du plasma……k

Tα : La température ambiante……...k

U : la composante axiale de la vitesse du gaz…….$m.s^{-1}$

UP: La composante axiale de la vitesse de la particule……...m. s^{-1}

UR: 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

Vr: La vitesse relative fluide/particule…….$m.s^{-1}$

Vp: La composante radiale de la vitesse de la particule……..m/s

we: La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de

We: Nombre de Weber

Z: section en…….m^2

Δs: La distance du point situé en amont à l'aval du nœud……m

Φ: Variable généralisée

Δ : coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark

λ: Le libre parcours moyen……..m

γ: le terme correctif.

ΓØ: Coefficient de diffusion.

σ: Constante de Stephan Boltzmann 5.67 10^{-8}……...$W.m^2.K^{-4}$

σs: La constante de Stephan-Boltzmann……..$W.m^{-2}.K^{-3}$

ρg: La masse volumique du gaz…….$kg.m^{-3}$

ε: Degré d'étalement

εm: Degré d'étalement maximum

Introduction générale :

La projection thermique est une solution très efficace pour la protection des surfaces des matériaux contre les contraintes mécaniques, thermiques et chimiques. Ce procédé trouve beaucoup d'applications dans plusieurs industries notamment : aérospatiale, biomédicale, sidérurgie , électronique et métallurgie.

Le principe de ce procédé consiste à injecter des fines particules dans un écoulement thermique où elles sont alors fondues et projetées à grandes vitesses vers une surface d'un substrat préalablement préparé. La fusion des particules est due à la très haute température existant dans l'écoulement qui rend possible la fusion des particules ayant des températures de fusion très élevées tel que les matériaux réfractaires et par la suite l'obtention d'un dépôt.

Le dépôt ainsi obtenu est constitué par l'empilement de particules, selon leurs tailles et masses volumiques utilisées, fondues ou partiellement fondues sur le substrat à couvrir et préalablement préparé à cet effet.

Notre travail est présenté en quatre chapitres :

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.

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 s'intéresse à la simulation numérique d'impact de goutte d'aluminium sur un substrat d'acier passant par une variation de pourcentage de l'air dans la goutte. Les résultats faits à partir d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel, c'est le code ANSYS.

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

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

I.1 Organigramme de la projection thermique :

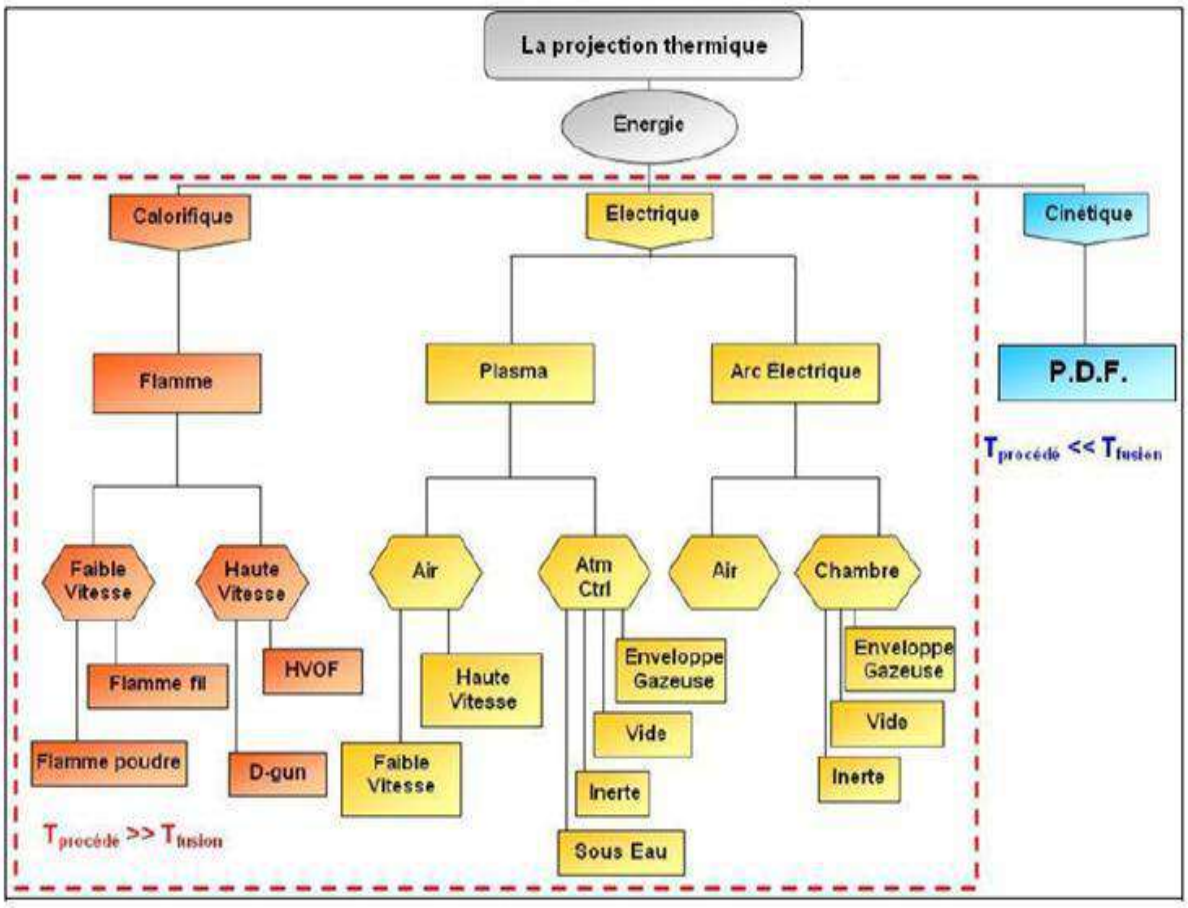


Figure I-1 : Organigramme de la projection thermique [1,2]

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]**

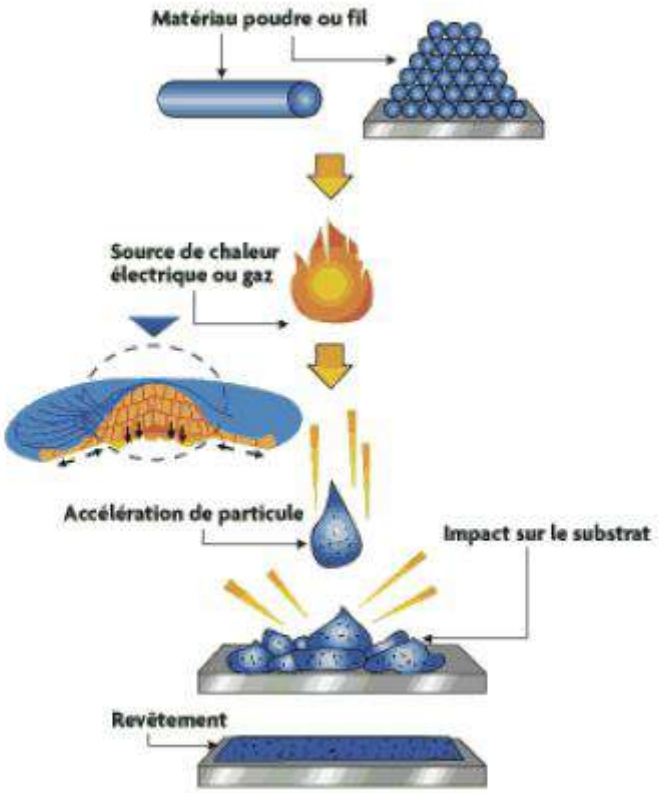


Figure I-2 : Principe de la projection thermique [3]

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 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 :

- **le procédé HVOF :** High Vélocité 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.

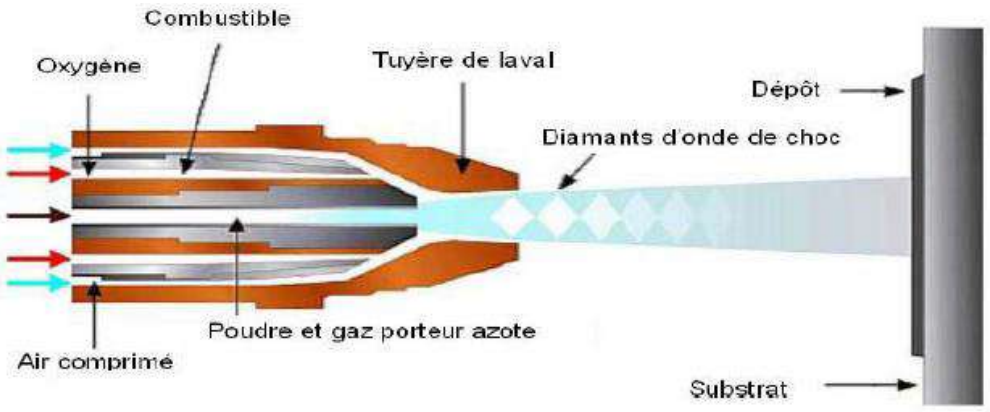


Figure I.3: schéma du procédé HVOF**[6]**

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]**

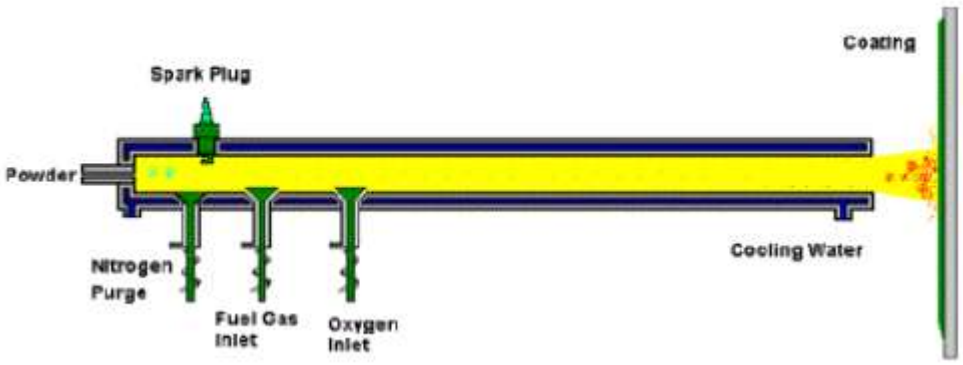


Figure I-4 : schéma du procédé canon a détonation**[7]**

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.

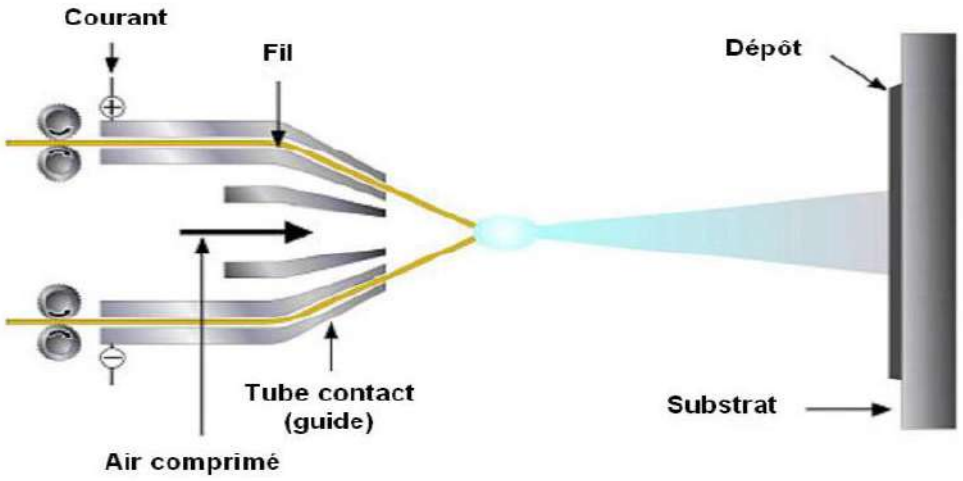


Figure I-5 : schéma du procédé arc fil**[7]**

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

Où cette fois-ci le matériau à projeter se présente sous la forme d'une poudre pulvérulente constituée de particules de tailles généralement comprises entre 10 à *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.

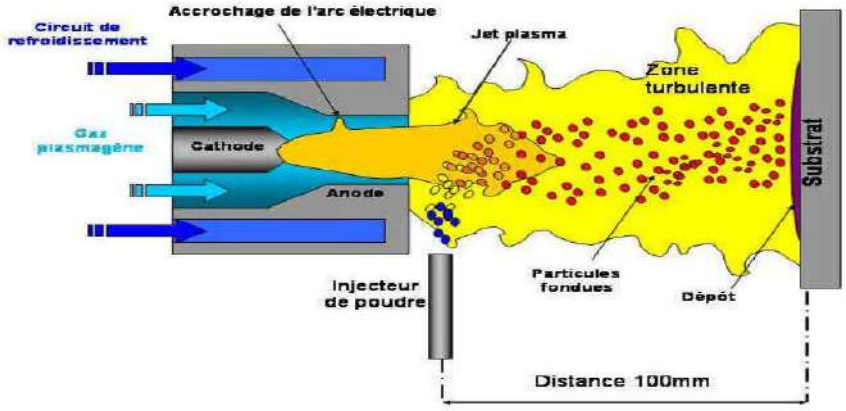


Figure I-6 : schéma de principe de la projection par d'arc soufflé**[8]**

I.3 La projection plasma :

Le plasma est considéré comme 4ème état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué d'une collection des molécules, atomes, ions et électrons dont l'ensemble est électriquement neutre **[10 ,13]**. La génération de plasma nécessite l'emploi de trois
éléments fondamentaux :

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

I.3.1 Définition :

Le jet de plasma est généré par l'arc électrique qui s'établit entre une électrode intérieure à la torche de coupage et la pièce. Le mélange gazeux ionisé à la sortie de la tuyère forme le plasma. Le pouvoir calorifique du jet (environ 18000C°) provoque une fusion quasi instantanée qui se propage dans toute l'épaisseur de la pièce. Sur une machine de découpe plasma, la température extrêmement élevée fait fondre instantanément le métal tandis que le gaz sous pression chasse au fur et à mesure les gouttelettes de métal en fusion. L'usage de la torche de découpage au plasma doit se faire impérativement dans des locaux spécialement ventilés ou en plein air à cause de dégagement de gaz toxiques généré par les très hautes températures de travail **[14].**

I.3.2 Plasma conventionnel :

Le procèdes de projection par plasma conventionnel désigne généralement sous le nom de projection par plasma a air atmosphérique c'est le procèdes le plus économique et le répandu dans le tissu industriel, il est applique essentiellement à la projection des matériaux peu sensible à l'oxydation et à la projection des matériaux céramiques.

I.3.3 Plasma de vide :

La technique de projection plasma sous vide, généralement désigne sous le nom du plasma à basse pression, utilisation aux pressions dans la gamme de 10 à 50 kPa (0.1à0.5 atm)...L'absence de l'oxygène et la capacité de fonctionner avec les températures plus élevées de substrat produisent des revêtements plus denses et plus adhérents contenant pur d'oxydes.

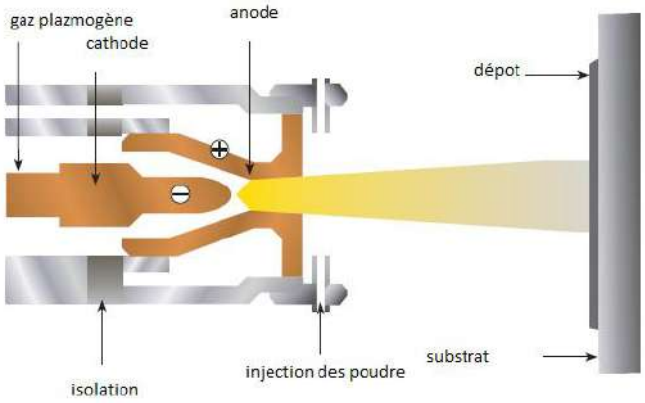


Figure I-7 : Principe la projection par plasma

I.4 Matériaux d'apport :

Un très grand nombre de matériaux sont utilisables avec l'ensemble des techniques ou avec une en particulier en forme de poudres, fils ou cordons. Tous matériaux peuvent être projetés. On distingue trois types de dépôts qui peuvent être utilise :

-matériaux monophasés, tel que des métaux, alliages, intermétalliques, céramiques et polymères.

-matériaux composites, telles que les cermets, métaux renforcés, et polymères renforcés

-matériaux multicouches, désignes sous le nom de matériaux a gradient fonctionnel **[15].**

I.5 Substrats :

Dans le cas de la projection thermique, l'état physico-chimique de la surface du substrat joue un rôle très important sur la structure des lamelles, la formation du dépôt et, par conséquent, son adhérence. Cette propriété est un critère de qualité important, car il est en R: rendement de projection effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas à son substrat **[16 ,17].**

I.6 Préparation de substrat :

Les techniques de préparation de surface doivent permettre de nettoyer les matériaux et de modifier l'état géométrique de leur surface. La réalisation d'un dépôt par projection thermique impose de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi **[18,19]** : un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passivant et des graisses.

C'est la première étape de préparation des pièces destinées à être revêtues. En effet, elle a pour conséquence la destruction et l'élimination de la plupart des impuretés (graisses, inclusions superficielles, etc.) généralement responsables de la mauvaise tenue des

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

I.7 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 **[20].** L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes: impact initial, étalement de la particule et refroidissement et solidification.A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse, il a été observé pour des particules d'alumine que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) se passe toujours si leur nombre de Sommerfeld K [7] 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'està- dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène.

I.8 Construction du dépôt :

Un dépôt réalisé par projection plasma, est formé par l'écrasement de particules sur un substrat préalablement préparé. Le dépôt, ainsi constitué, peut se représenter par une structure lamellaire hétérogène **[21]** (une particule est déjà solidifiée lorsque la suivante arrive au même point) constituée par un empilement de particules individuelles plus ou moins bien fondues **[22].** La structure lamellaire des dépôts est responsable de l'anisotropie des propriétés mécaniques **[23]**. La qualité des dépôts projetés dépend essentiellement de la morphologie des lamelles et de la nature du contact entre elles **[24, 25, 26]**. Une bonne compréhension des mécanismes gouvernant l'écrasement des particules est donc indispensable.

I.9 Etalement de la particule :

Une fois que la particule a percuté le substrat, elle continue à se déformer et à s'étaler. En effet lorsqu'une particule vient impacter sur un substrat, elle s'étale grâce à sa pression interne pour former une lamelle. L'énergie cinétique de la particule en vol est transformée en travail de déformation visqueuse puis en énergie de surface. L'étalement est alors contrôlé pardes phénomènes mécaniques et thermiques. Sur un substrat lisse, cet étalement peut être décomposé en trois étapes (qui peuvent être dépendantes) : une phase très courte, de quelques

nanosecondes, correspondant à l'impact initial avec le plus souvent le phénomène de Éclaboussures (splashing), une deuxième phase de l'ordre de la microseconde correspondant à l'étalement de la

particule avec ou sans éclaboussures (flattening, splashing) et une troisième de quelques microsecondes correspondant au refroidissement de la lamelle comme le montre la Figure (**I-8**) . La solidification de la lamelle commence généralement avant que son étalement soit complètement terminé.

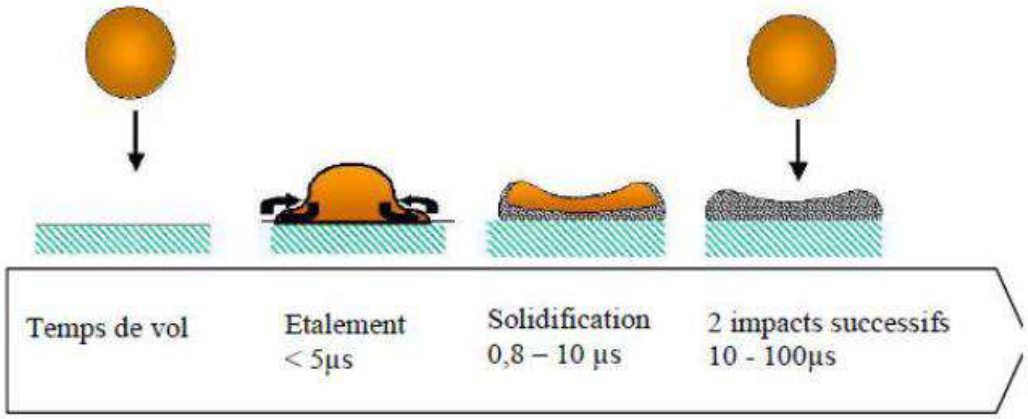


Figure I-8 : Mécanisme d'étalement des lamelles **[27]**

I.10 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 **[28]**.

I.11 Formation du dépôt :

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.

I.12 Solidification et refroidissement des particules :

La vitesse de refroidissement a été estimée à l05-106 K/s. En effet, la chaleur est rapidement extraite au travers de l'interface substrat/particule, ce qui implique une grande vitesse de refroidissement **[30]**.

I.13 L'état de l'art :

Ahmed et **Rangel[31]** ont étudié numériquement l'impact et la solidification d'une gouttelette en aluminium sur les substrats rugueuse, en utilisant un modèle axisymétrique bidimensionnel. Leurs résultats prouvent que l'impact de gouttelette sur un substrat rugueuse est presque toujours accompagné par l'éclaboussement. Cependant, le degré d'éclaboussement diminue avec l'augmentation de la rugosité. Les particules fondues qui impactent sur la surface à revêtir s'étalent en 1 à 2µs et solidifient en 2 à 10 µs, la solidification commençant avant la fin de l'étalement. L'impact d'une particule suivante n'intervient en général qu'au bout de 10 à 100µs **[32].**L'empilement successif des lamelles forme le dépôt. La lamelle constitue donc, la brique fondamentale dans la construction du dépôt.

Fukanuma[34] a présenté une formule qui décrit le processus d'aplatissement d'une gouttelette sur une surface approximative, et a conclu que le rapport d'aplatissement diminué dans le temps avec l'augmentation de la rugosité. Xu et autres **[34]** avaient utilisé la photographie à vitesse élevée pour étudier l'éclaboussement de corona dû à l'impact d'une gouttelette liquide sur un substrat secet lisse. Ils ont découvert que la pression de gaz environnante décroissante empêche l'éclaboussement. Et la pression de seuil est une fonction de la vitesse d'impact, du poids moléculaire du gaz, et de la viscosité liquide. Ils ont conclus aussi que la compressibilité du gaz est responsable de l'éclaboussement.

La formation d'une lamelle dépend à la fois de paramètres liés à la particule en vol (sa taille, sa vitesse, sa température, son état de fusion à l'impact, et ses propriétés thermo-physiques) et de paramètres liés au substrat (ses propriétés, son état de surface, sa température de préchauffage et la présence éventuelle d'oxydes sur sa surface).

Zhang a proposé un modèle théorique basé sur le volume de fluide (VOF) pour la propagation de gouttelette et la solidification considérant la tension superficielle, la solidification et la résistance thermique de contact. Le rapport splat-flattening a été décrit en fonction des nombres de Reynolds, de Weber, de Prandtl et de Jakob. Zhang et autres **[35]** ont étudié la morphologie de l'impact et la re-solidification de substrat numériquement et expérimentalement et ont constaté que la taille, la vitesse, et la température, de gouttelette d'un part et le matériau de substrat et leur température jouent les rôles significatifs dans la morphologie de l'impact et le taux de solidification.

Zhao et autres[36] et **Pasandideh-Fard et autres[37]** ont proposé des modèles détaillés en résolvant l'équation de Navier-Stokes couplée à l'équation d'énergie. Leurs prévisions théoriques de la propagation de gouttelette étaient en bon accord avec les données expérimentales. Cependant, les procédures numériques adoptées dans ces modèles étaient informatique chères. De tels modèles détaillés sont plus utiles pour obtenir une compréhension fondamentale profonde sur les processus physiques impliqués dans le phénomène d'impact.

Mostaghimiet **et al.[40]** ont montré que le rapport d'aplatissement est lié au nombre de Reynolds et, au nombre de Weber. Cependant, l'effet de la solidification sur la propagation de gouttelette peut être négligé quand le rapport du nombre de Stefan au nombre de Prandtl est beaucoup plus petit que l'unité.

Dans le même contexte nous proposant dans cette mémoire une étude numérique de l'impact successive de deux particule d'alumina à prise d'air, dans l'objectif de mieux comprendre le phénomène d'interaction des particules lors de l'étalement.

CHAPITRE 2
MODELISATION MATHÉMATIQUE

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons écrit une brève présentation des équations mathématiques régissant l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible en régime laminaire et les méthodes numériques qui sont utilisés pour la par le module APDL du logiciel ANSYS v11 pour la résolution du problème.

Nous ne considérons ici que les aspects relatifs aux caractéristiques dynamiques de l'écoulement laminaire avec transfert de chaleur.

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 :

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

Dans un système de coordonnées cartésiennes, la vitesse $\vec{V}$ = (u, v, w) et **ρ** c'est la densité

Donc l'équation devient :

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

II.2.2 Equation de quantité de mouvement :

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

Où :

ρ : la densité considérée variable avec le temps.

μ : la viscosité dynamique aussi variable.

P : le pression

$\vec{g}$: la gravit

II.2.3 Équation de l'énergie :

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

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

T : température.

q : source volumique.

II.3 Modèle thermique :

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

II.3.1 Transfert de chaleur avec changement de phase :

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) **[43].** C'est pourquoi la dénomination << problème de Stefan>>pour un changement de phase est toujours utilisée même pour des formulations plus complexes que le problème initial. Dans le problème de Stefan, le changement de phase est considéré comme une transformation isotherme instantanée. Depuis une vingtaine d'années de multiples méthodes numériques ont

été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de Stefan **[44].** En général ces méthodes cherchent à approcher la position du front de solidification/fusion au cours du temps, et se divisent alors en deux catégories principales:

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

II.3.1.1 Méthode à grille mobile :

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante **[45]** :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

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

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

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

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

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

Dans les équations ci- dessus,

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

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

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif, le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier **[44].**

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

II.3.1.2 Méthode à grille fixe :

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

II.3.1.2.1 Méthode d'enthalpie :

La méthode d'enthalpie à maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide. Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et al**[46].** Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'à aujourd'hui **[47]**.

L'équation d'énergie est écrite à la fois dans la phase liquide et la phase solide, et pour déterminer la progression de l'interface Γ, le modèle de conduction prend en compte la chaleur latente. Cette formulation requiert un algorithme de suivi du front particulièrement fin. La fonction d'enthalpie massique H(T) est introduite (figure II.1) elle inclut la chaleur latente par unité de masse L_f et est définie comme suit :

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

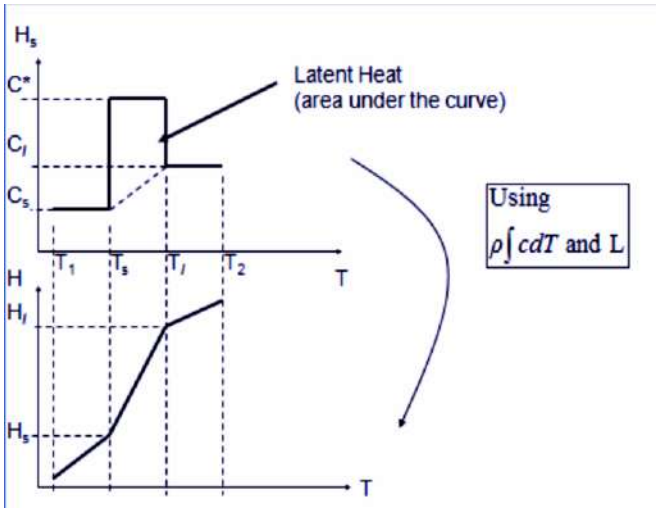


Figure II.1 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température **[48].**

La conservation de l'énergie s'exprime alors **[48]**.

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

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

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

Et en fonction de la température

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

II.3.1.2.2 Méthode de la chaleur spécifique équivalente :

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique c_p**[47]**. Ainsi, si le chemin de solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente :

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

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

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

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

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

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

II.3.2 Modèle thermique utilisé :

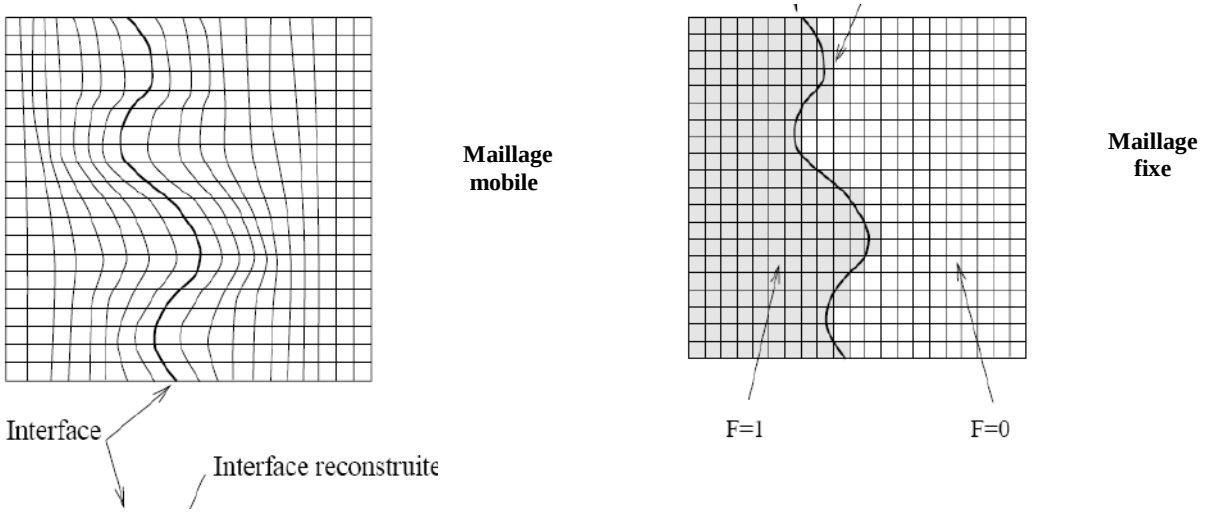
Le modèle de transferts thermiques que nous avons adopté est basé sur une formulation à chaleur spécifique équivalente, d'un fluide en mouvement qui va permettre donc de contrôler les conversions d'énergie dans le système. Le modèle de transferts thermiques à chaleur spécifique équivalente convient particulièrement bien aux modèles à domaines fixes,

puisqu'elles ne nécessitent pas d'imposer explicitement la condition de changement de phase à l'interface solide/liquide. D'autre part, c'est aussi la formulation la plus adaptée à la résolution numérique des problèmes à changement de phase an isotherme.

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

II.4 Calcul d'interfaces :

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



a) Méthode lagrangienne **b)** Méthode Eulérienne

Figure II.2 : Présentation des méthodes de calcul d'interface
a) méthode Lagrangienne**, b)** méthode Eulérienne**, [48].**

La méthode lagrangienne : consiste à discrétiser un seul des deux fluides en présence, et considérer l'interface des deux fluides comme condition limite du problème. les équations de **Navier-Stokes** dans ce domaine permettent le mouvement de ce milieu sans prendre en compte l'autre fluide. Cela nécessite un maillage adaptif qui suit les déformations de l'interface .l'intérêt de ce type de méthode est de fournir avec précision l'évolution de la

surface libre en fonction du temps et grâce à un maillage évolutif, de raffiner localement pour améliorer la précision des phénomènes liés à l'interface. Les inconvénients de cette méthodologie résident dans le coût et le temps de calcul nécessaire à la reconstruction de l'interface et des conditions limites du système à chaque pas de temps .de plus, cette méthodologie n'est pas bien adaptée aux problèmes de rupture de fluide que l'on rencontre par exemple lors du splash qui génère des gouttes secondaires.

La méthode eulérienne : elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides .l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première **[49]** ; cependant de part sa nature, cette méthode nécessite de déterminer la position et la géométrie de l'interface, grâce à l'équation couleur.

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

Les méthodes de suivi de front

Les méthodes de suivi de volume

II.4.1 Les méthodes de suivi de front :

Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

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

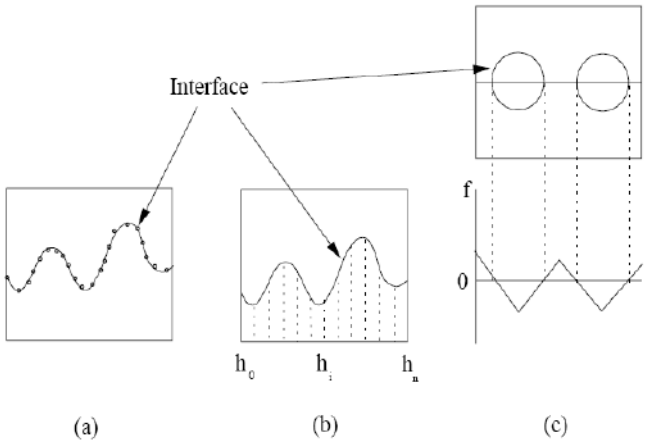


Figure II.3 : Différentes méthodes de suivi de front
a)marqueur de surface, b) fonction de hauteur, c) méthode de ligne de niveau, **[50].**

II.4.2 Les méthodes de suivi de volume :

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

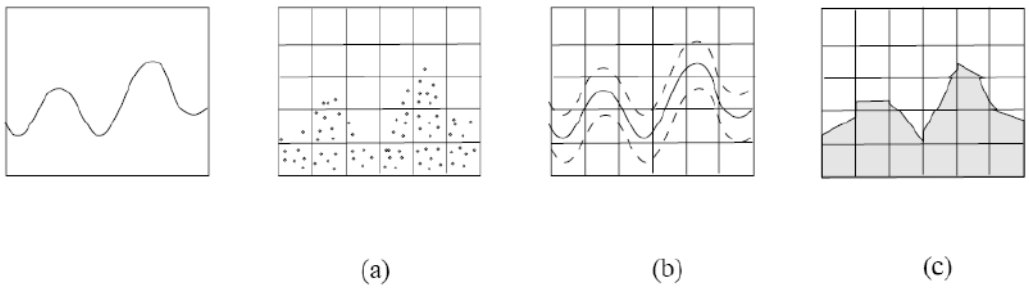


Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque [51,52].

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

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

de une et une maille vide à une valeur de zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide (figure II.5).

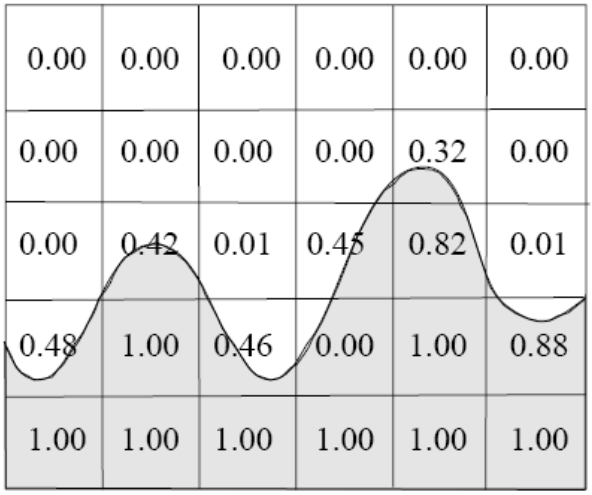


Figure II.5 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret **[53].**

II.4.3 La Méthode VOF CIAM :

On utilise la méthode VOF CIAM qui est une méthode de construction de l'interface affine par morceaux. VOF CIAM se décompose en trois parties : on doit tout d'abord reconstruire la représentation de la surface libre à partir de la fraction volumique ensuite on transporte l'interface à l'aide d'une méthode lagrangienne et enfin on calcule le nouveau champ de fraction volumique. L'interface est alors approchée par un segment en 2D comme

On peut le voir sur la (figure II.6). La force de la méthode VOF CIAM est la reconstruction de l'interface qui se fait en fonction de son orientation et de la fraction volumique. Ainsi ; par rapport à des méthodes qui utilisent des schémas de discrétisation (schémas UPWIND, QUICK, TVD..), on élimine totalement le phénomène de diffusion numérique, et par rapport à d'autres méthodes VOF (VOF SLIC) on suit l'interface de façon plus précise.

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

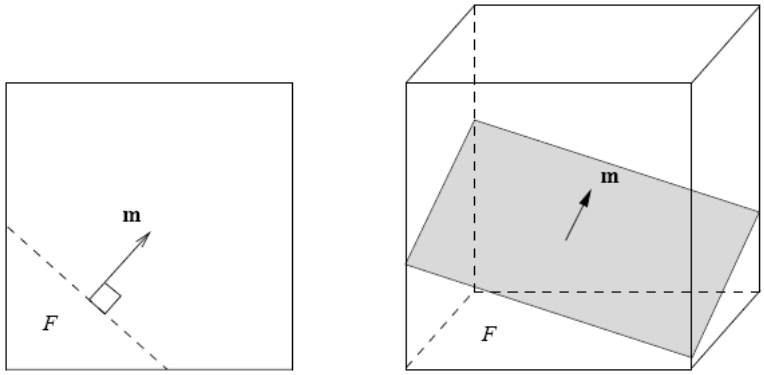


Figure II.6 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique **[54].**

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

$$\begin{cases} \nabla.\mathrm{u} = 0 \\ \frac{\partial \mathrm{C}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{V}.\nabla \mathrm{C} = 0 \\ \rho\left[\frac{\partial(\rho \mathrm{u})}{\partial \mathrm{t}} + \nabla.(\rho \mathrm{uu})\right] = -\nabla \mathrm{p} + \rho \mathrm{g} + \nabla.(\mu[\nabla \mathrm{u} + \nabla^{\mathrm{T}}\mathrm{u}]) - \sigma\nabla\left[\frac{\nabla \mathrm{C}}{\|\nabla \mathrm{C}\|}\right].\frac{\nabla \mathrm{C}}{\|\nabla \mathrm{C}\|} \\ \rho \mathrm{c}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{ea}}\left[\frac{\partial(\mathrm{T})}{\partial \mathrm{t}} + (\mathrm{u}.\nabla)\mathrm{T}\right] = \nabla.(\lambda\nabla \mathrm{T}) + \mathrm{Q} \end{cases} \quad \text{(II,16)}$$

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

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

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc.

II.5 Conclusion :

Les formulations mathématiques du modèle dynamique et thermique sont présentées dans ce chapitre. Egalement, la méthode de volume de fluide (VOF) en deux dimensions, utilisée pour simuler le transport de l'interface, est présentée en détail.

CHAPITRE 3

FORMULATION NUMERIQUE

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes numériques utilisées pour la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles, en l'occurrence la méthode des différences finis, la méthode des éléments finis et la méthode de volumes finis.

III.2 Les méthodes numérique

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

- la méthode des différences finies.
- la méthode des éléments finis.
- la méthode des volumes finis.

III.2.1 méthode des différences finies

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

- **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 dérivées ou les gradients de l'inconnue.

III.2.2 méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à rapprocher les équations différentielles régissant pour un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'ils peuvent facilement être programmés. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais ils ont été étendus à de nombreux problèmes du terrain. Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et

III.2.3 méthode des volumes finis

Cette méthode est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles comme la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis mais, contrairement à la méthode de différence finies qui utilise des approximations de dérivées, la

méthode de volume fini utilise comme la méthode d'éléments finis, des approximations d'intégrales. Dans la méthode des volumes finis les lois de conservations (de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sons une forme intégrale..

III.3 Résolution des équations par éléments finis :

III.3.1 Méthodes des éléments finis :

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

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

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

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée$\emptyset_h^k$, est de la forme **[56]**:

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

Où :

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

N_i : La fonction d'interpolation associée àx_i,

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

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

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

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

III.3.2 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis :

III.3.2.1 Formulation variation elle forte :

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

Trouver u(x) *u(x)* espace des solutions $U_S$telles que **[57,58]** :

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

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

III.3.2.2 Formulation variationelle faible :

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

1. approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par $\tilde{u}$tel que **[56,59]** :

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

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

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

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

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

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

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

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

On pose

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

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

si :

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

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

$$Lu = 0\ sur \Omega\ et\ u = 0\ sur\ \partial\Omega \qquad (III.8)$$

III.3.3 Forme généralisée des équations du système et discrétisation :

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\emptyset \emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_\emptyset \emptyset) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_\emptyset \emptyset) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) + S_\emptyset \qquad (III.9)$$

Où :

$\emptyset$: Variable généralisée.

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

$\Gamma_\emptyset$: Coefficient de diffusion. $S_\emptyset$: Terme source.

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

Tableau III.1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[60].**

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

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

Le procédé de discrétisation par EF consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire **[57]**.

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

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

III.3.3.1 Terme temporelle :

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[57]** :

$$\left[A_e^{transient}\right]=\int W^e\frac{(\partial\rho c_\emptyset\emptyset)^e}{\partial t}d(vol) \qquad (III.11)$$

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

$$\int W_i^e \frac{(\partial \rho c_\emptyset \emptyset)^e}{\partial t} d(vol) = \int W_i^e \rho c_\emptyset W_j^e \, d(vol) \frac{\partial \emptyset_j^e}{\partial t} + \int W_i^e \frac{\partial \rho c_\emptyset \emptyset_j^e}{\partial t} W_j^e \, d(vol) \emptyset_j^e \qquad (III.12)$$

Les indices inférieurs i et j indiquent le nombre de nœud. Si la deuxième partie de l'équation (III.11) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme:

$$M_{ij} = \int W_i^e \rho c_\emptyset W_j^e \, d(vol) \qquad (III.13)$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$M_{ij} = \delta_{ij} \int W_i^e \rho c_\emptyset \, d(vol) \qquad (III.14)$$

Où :

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

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

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

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

Où :

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

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

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

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

$$\left(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t} \right)_n = \frac{(\rho\emptyset)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\emptyset)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\emptyset)_n}{2\Delta t} \qquad (III.17)$$

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

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

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

III.3.3.2 Terme d'advection :

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

III.3.3.2.1 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. Voir Le Schéma III.1: " l'Approche des ligne de courant D'Upwind ".

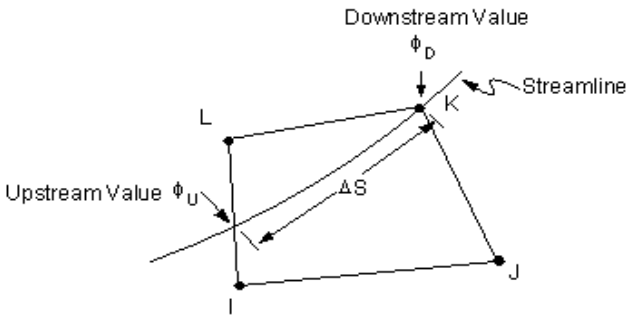


Figure III.1 : Approche de ligne de courant d'Upwind **[60].**

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

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c'est-à-dire, tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit **[60]** :

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

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{ds} \int W^e d(vol) \qquad (III.20)$$

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

$$\frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s)}{ds} = \frac{(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_U - (\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_D}{\Delta s} \qquad (III.21)$$

Où:

D = Indice de la valeur au niveau du nœud aval

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

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

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

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'u pwind aux nœuds voisins.

III.3.3.2.2 Method 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 **[60]** :

$$\left[A_e^{advection}\right] = \int W^e \left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) + C_{2\tau} \int \frac{Zh}{2U_{max}^e} \left\{\frac{V_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial W^e}{\partial y}\right\} \left\{\frac{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(vol) \quad (III.22)$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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

III.3.3.2.3 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 **[60]**.

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

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

III.3.3.3 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 **[60]**.

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

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée **[60]** :

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

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

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = W_x^e \emptyset \qquad (III.26)$$

$$W_x^e = \frac{\partial W^e}{\partial x} \qquad (III.27)$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

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

III.3.3.4 Termes source :

L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[60]**:

$$S_\emptyset^e = \int W^e S_\emptyset d(vol) \qquad (III.29)$$

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail la méthode des éléments finis pour la résolution des problèmes couplés (dynamiques et thermiques). Le principe de la méthode est la discrétisation du domaine de calcul qui permet par la suite de faire le passage de l'EDP vers des systèmes d'équations algébrique facile à résoudre, relativement. Vu que la méthode des éléments finis est utilisée par plusieurs logiciels de simulation, nous avons choisi pour notre simulation le module APDL du logiciel ANSYS v11, qui est une référence mondiale dans ce domaine.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de simulation numériques d'impact d'une goutte d'aluminium sur un substrat d'acier comparer avec celle de ; **Mostaghimi [62]** d'autre part, la simulations numériques d'impact de goutte d'aluminium sur un substrat d'acier passant par une variation de pourcentage de l'air dans la goutte. Les résultats faits à partir d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel, c'est le code ANSYS.

IV.2. ANSYS :

Le code de calcul ANSYS est un programme Elément Finis permettant de traiter des structures tridimensionnelles dans les domaines suivants : thermiques, mécanique, statiques et dynamique linéaires et nom-linéaires, interaction fluide-structure, analyse à la fatigue…
Le code propose une libraire d'étalement pour modéliser correctement les structures et les différents effets recherchés (poutres, coques, solide, fluide, matrices de raideur, de masse, d'amortissement, etc.).

IV.2. 1.Les points forts des outils ANSYS sont :

- Une interface WORKBENCH intuitive et très facile à prendre en main.
- L'associativité avec tous les outils CAO 3D disponibles sur le marché.
- La possibilité de communiquer avec tous les logiciels CAO marché : en format natif avec Catia V4 et V5, Solid Edge, NXU nigraphics Pro/Engineer, Solid Works, Autodesk Inventor et Mechanical Desktop, et par l'intermédiaire de passerelles Acis et Parasolid intégrées avec tous les autres produits.
- Des notes de calcules automatiques.
- Des meilleurs robustes.
- Des outils de convergence automatique.
- Une gestion automatique des assemblages et des contacts.
- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités.

IV.2.2.Les outils de simulation se présentent sons plusieurs niveaux :

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

IV.2.3.Schéma de logiciel ANSYS :

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

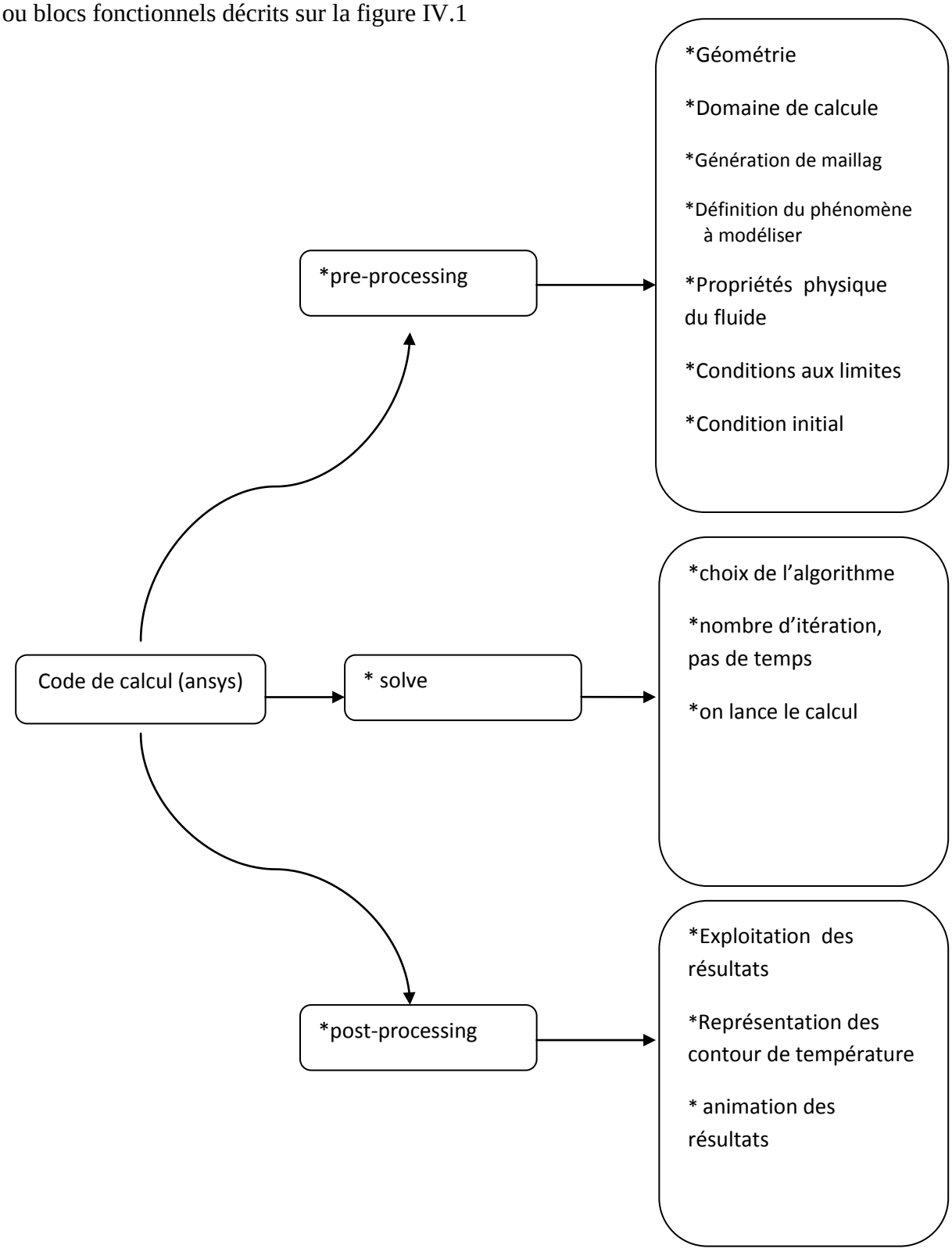


Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.3. Matériaux utilisé :

Dans cette étude numérique, nous sommes intéressés à des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat en acier. Sur le substrat métallique, la température de préchauffage du substrat, joue un rôle important dans le processus de formation des lamelles.

IV.3.1. L'aluminium :

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

- ✓ Une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur la tente de fusion importante de l'ordre de $1.09.10^{6}$j/kg.
- ✓ Une bonne résistivité électrique >1012 Ohm.m**[60].**
- ✓ Une dureté HV sons une charge de 1N de 9.21 Gpa**[60]**.
- ✓ Une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10^{-5} mm^3 /Nm, à l'abrasion par une bille de sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à $3.10^{-3}mm^3$/Nm lorsque la température augmente à 400°C.
- ✓ Une bonne résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux halogènes et aux métaux et une bonne résistance à l'oxydation. Ces performances font de ce matériau l'objet de nombreuses dans des domaines très variés :
- ✓ Les applications mécaniques, l'aluminium est l'abrasif le plus répandu de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides.
- ✓ Les applications réfractaires, résistance aux hautes températures ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion à hautes température.
- ✓ Les applications médicaux ; le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie.
- ✓ Les applications électrique et électronique : l'aluminium et utilisée dans la fabrication des bougies d'allumage pour automobile et dans de nombreux produits d'isolation.
- ✓ Les application optique : les films d'aluminium permettent la réalisation de guide d'onde optique dans le visible et l'infrarouge et permettent aussi de protéger des capteurs solaires **[60]**

Tableau IV.1 propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. **[61]**

Propriétés	Alliage d'aluminium	Acier d'outil
Densité (kg/m3)	2570	7800
Température de fusion (c°)	750	*
Chaleur de fusion (j/kg)	389	*
Viscosité cinématique (m2/S)	°c 0 4.5 E-7 700 4 E-7	*
Conductivité thermique liquide [W/m K]	70	*
Tension superficielle [N/m]	1.07	*
Conductivité thermique solide [W/m K]	°c 400 144 500 147 630 70	°c 200 26
Chaleur spécifique [j/kg k]	°c 300 980 400 1050 479 1150	°c 20 460 500 550 600 590

IV.4 Identification :

Pour l'identification, ou l'objective est de justifie le model utilisé; nous proposons pour cette première partie de notre travail de comparer nos résultats de simulation d'impact de goutte sur un substrat dans les mêmes conditions des travaux numérique et expérimental de **Mostaghimi [61].**

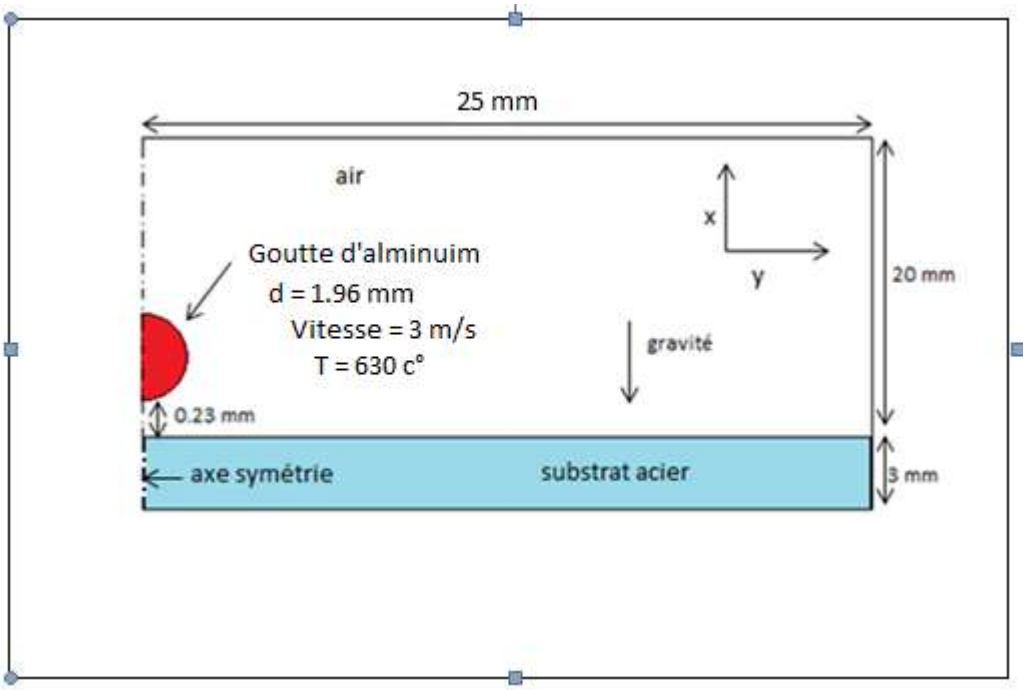


Figure IV. 2 : configuration géométrique et conditions d'étalement de L'identification.

IV.4.1. Impact d'une particule d'aluminium totalement fondue :

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

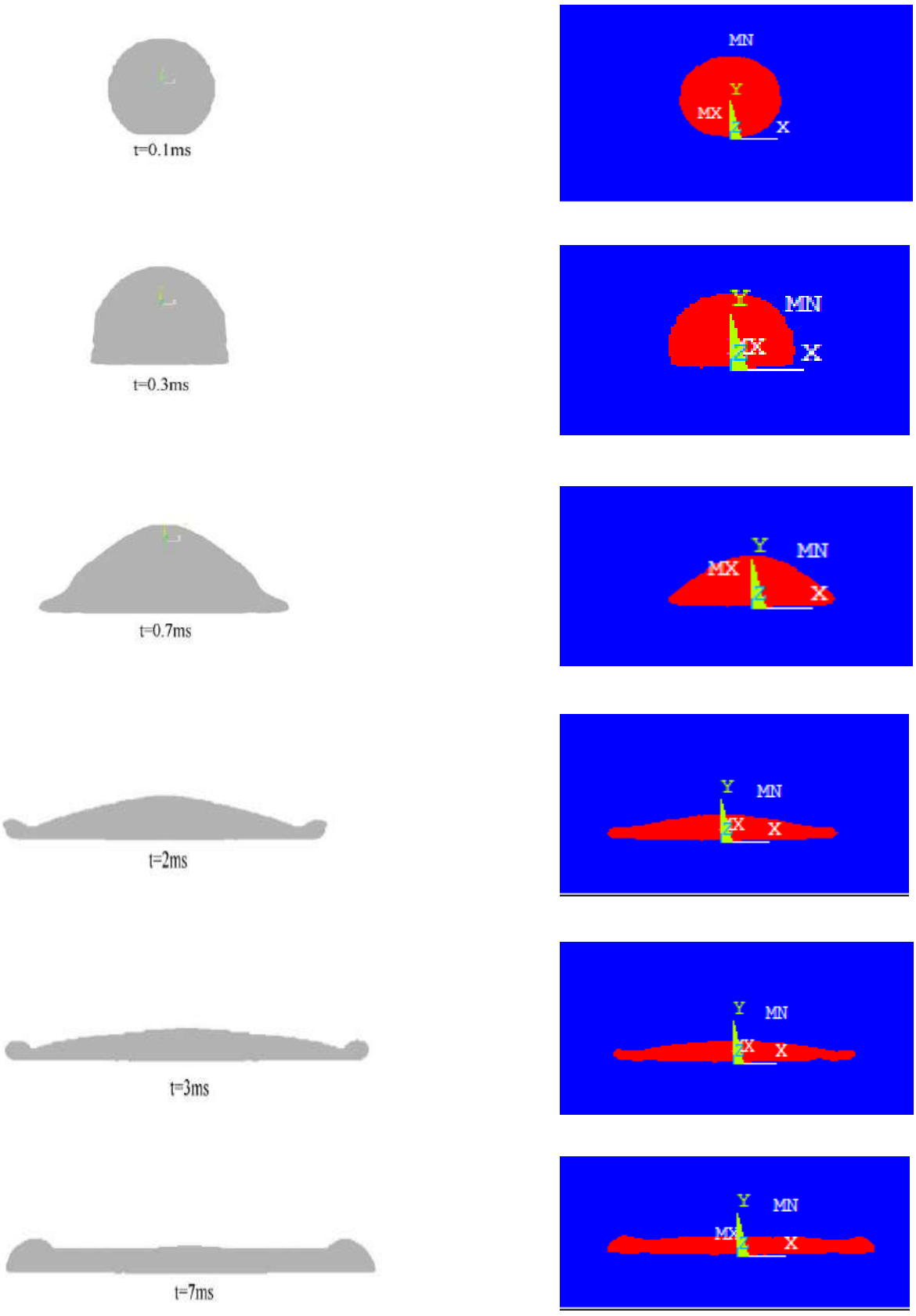


Figure IV.3 : représente les étapes de la dynamique d'étalements et la variation de température pour chaque temps.

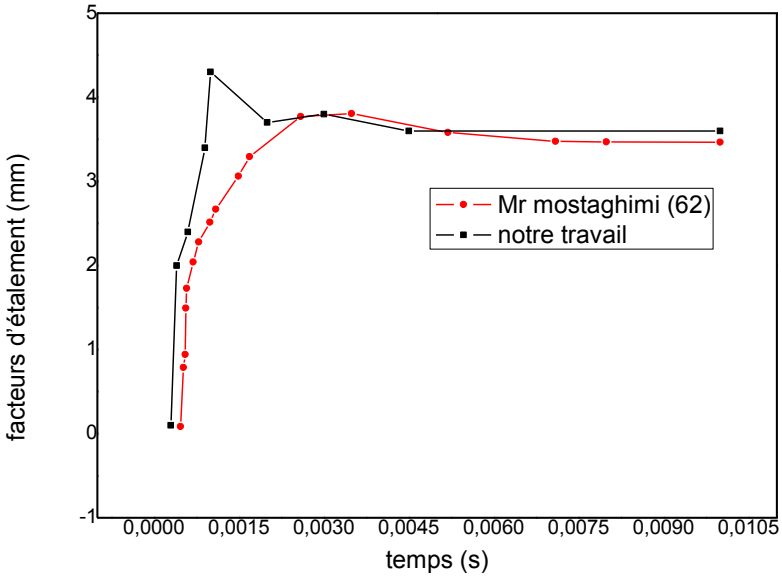
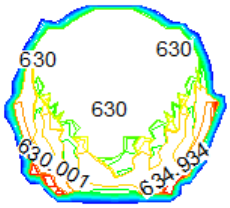


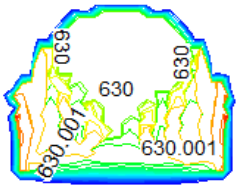
Figure IV.4 : F acteur d'étalement

La figure IV.4, représente une comparaison des facteurs d'étalement de l'impact dans le temps pour les mêmes conditions de l'expérience réalisée par **Mr .j Mostaghimi [62]** .

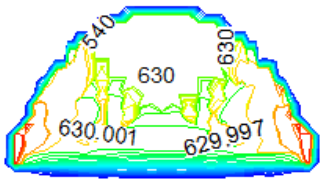
T=0.1ms



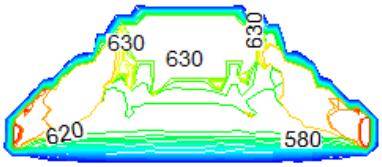
T=0.3ms



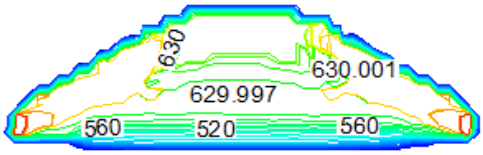
T=0.5ms



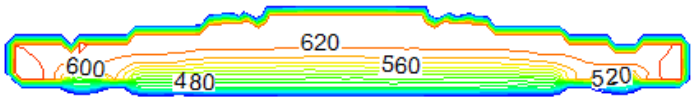
T=0.7ms



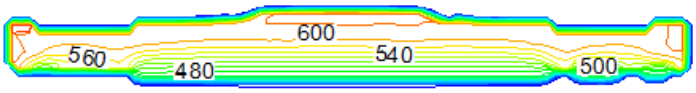
T= 1ms



T= 3ms



T= 5ms



T= 7ms

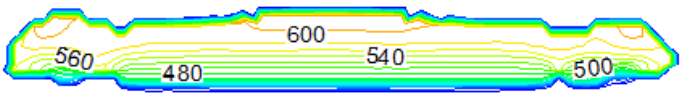


Figure IV.5 distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre, à 200°C avec une vitesse de 3m/s le temps d'étalement t=7ms c'est bon résultat.

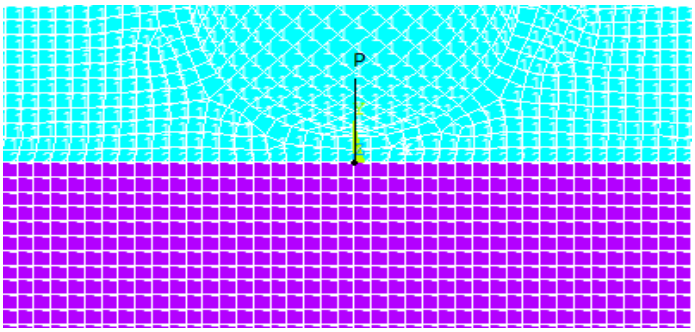


Figure IV.6 : point de pression de notre choix

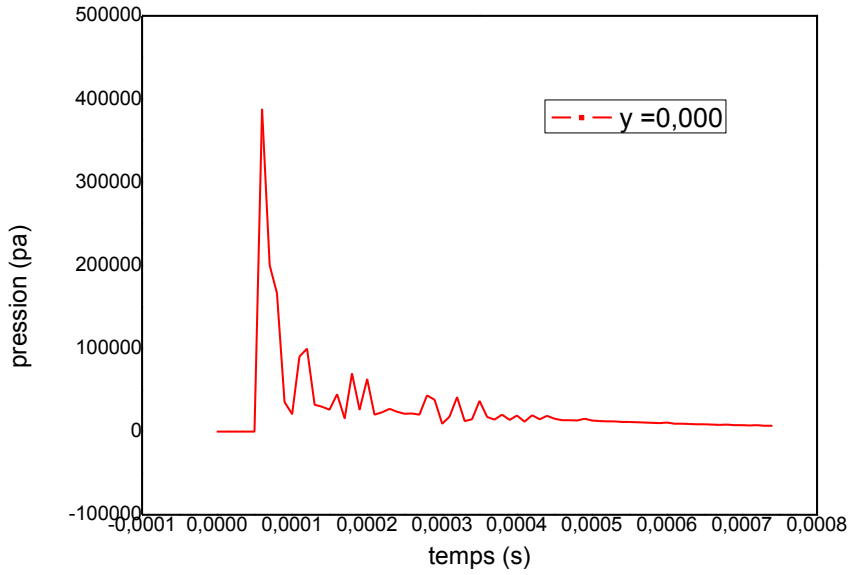


Figure IV.7: la variation de la pression au point d'impact

La figure IV.7 illustre la variation de pression en fonction de temps dans la zone de point de contact c'est-à-dire dans le point de *y*=0. La figure illustre clairement que, à l'instant t=0 la pression égale 0, mais D'après un certain temps la pression augmente fortement vers une valeur de pression maximale P=400KPa avec l'augmentation de temps (c'est à dire la goutte s'écrase sur la surface de substrat), nettement supérieure à la valeur nécessaire à l'accrochage mécanique. D'après cette valeur de pression, on remarque aussi que la pression diminue lentement vers une valeur de pression nulle à cause de la solidification de la goutte sur le substrat.

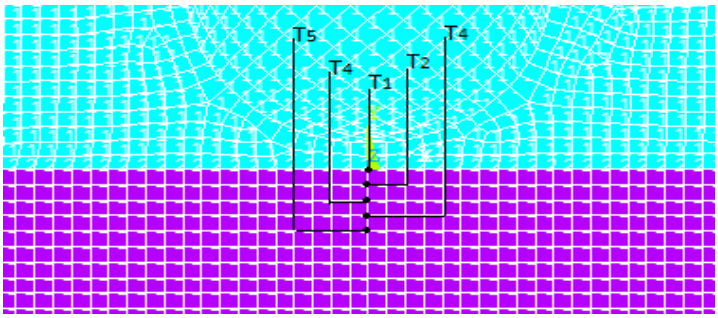


Figure IV.8 : Positions des points de notre choix

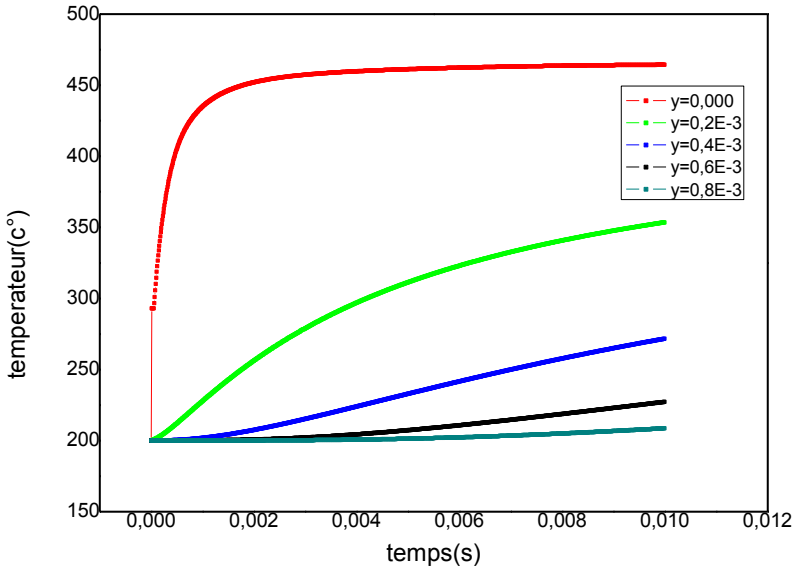


Figure IV.9 : profiles de température en fonction de temps pour cinque position au long de substrats verticalement

La figure IV.9 représente le comportement de température sur le substrat en fonction de moment de l'impact jusqu'à la fin d'étalement et pour différents station de *y*. D'après cette figure on constate que la température augmente progressivement avec l'augmentation de temps pour chaque station de y. En général, on remarque que, la température est maximale au point de *y*=0 (point de contacte), mais elle est diminue dans les autres zone (c'est-à-dire loin de point de contacte).

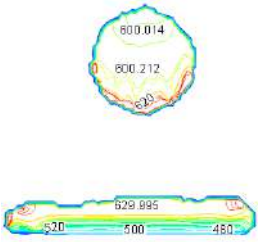
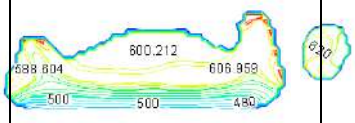
IV.5. Description du domaine d'application :

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

IV.5. 1.Premier cas 0% d'air :

Tableau IV -2 : représente la distribution de température pendant l'impact de deux gouttes une goutte (base) à une température de 630°C et deuxième goutte (haute) à une température de 600°Cavec un substrat en acier à une température de 200°C. Où le modèle de transfert de chaleur montre une grande température sur les extrémités de lamelle avec une solidification retardé.

Tableau IV -2 : distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C

			
0.1 ms	0.3 ms	0.5 ms	0.7 ms
			
1 ms	3 ms	7 ms	9 ms

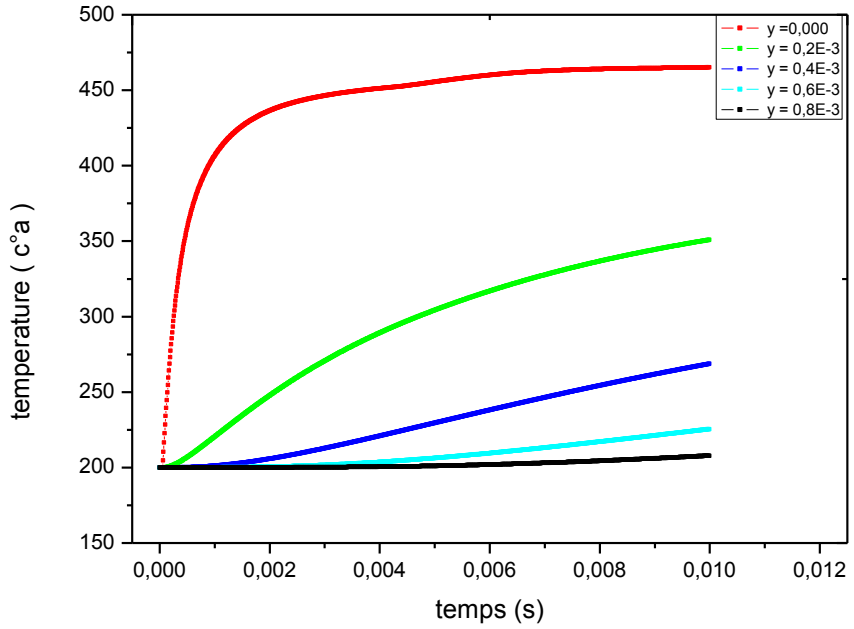


Figure IV.10: profiles de température avec le temps premier cas

La figure IV.10 montre la variation de température en fonction de temps pour différents stations (y=0, 2e-04, 4e-04, 6e-04 et 8e-04). D'après cette figure on observe que, à partir de temps égale 0 la température initiale égale 200°C, tandis qu'on augmente le temps on observe que la température augmente progressivement vers une valeur constante. La figure illustre clairement que dans le cas on approche vers le substrat la température augmente et vice versa.

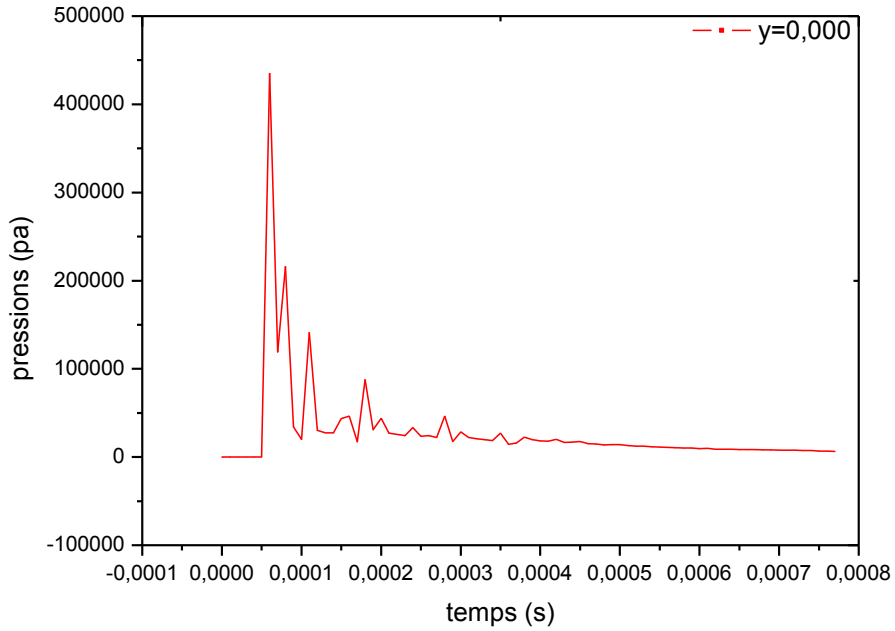


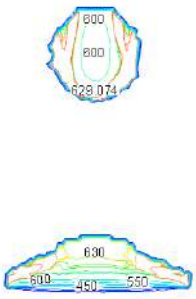
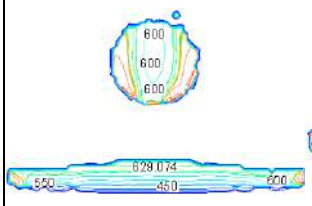
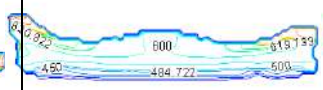
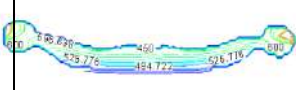
Figure IV.11: la variation de la pression au point d'impact pour le premier cas

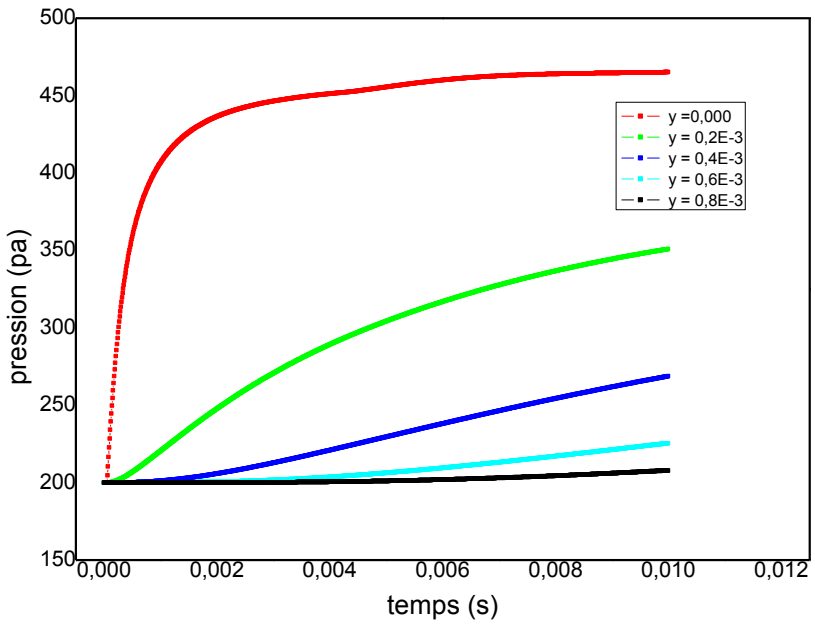
La figure IV.11 illustre l'évolution de pression en fonction de température On remarque à l' instant t=0.00008 la pression prends la valeur maximal 450000 Pa et lorsque le temps augmente la pression converge vers une valeur constante proche de zéro.

IV.5. 2.Deuxième cas 25 % d'air :

le Tableau IV -3 : représente la distribution de température pendant l'impact de deux gouttes une goutte (base) à une température de 630°C et deuxième goutte (haute) à une température de 600°Cavec un substrat en acier à une température de 200°C. Où le modèle de transfert de chaleur montre une grande température sur les extrémités de lamelle avec une solidification retardé.

Tableau IV -3:distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C

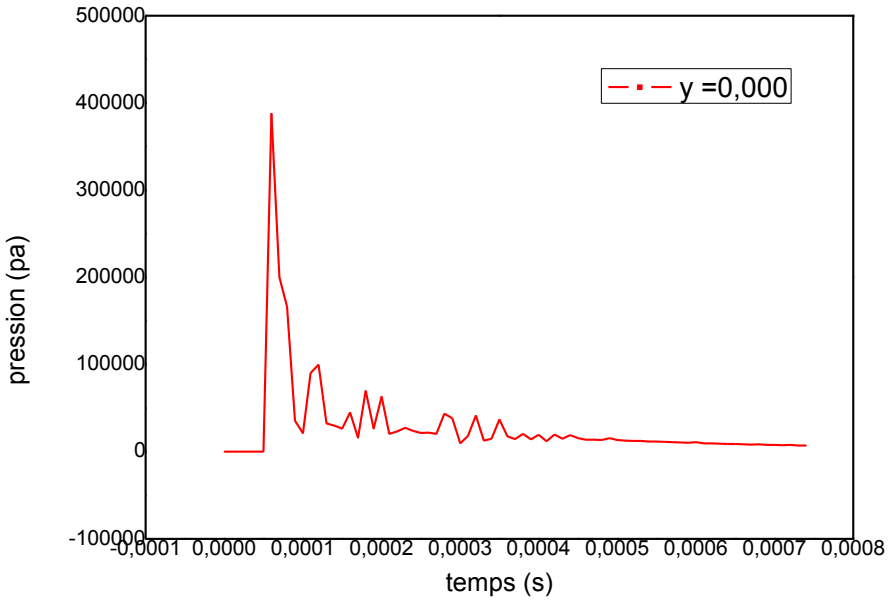
			
0.1 ms	0.3 ms	0.5 ms	0.7 ms
			
1 ms	3 ms	7 ms	9 ms



)

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

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

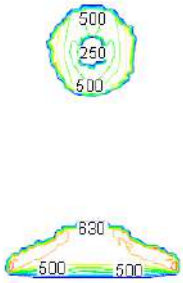
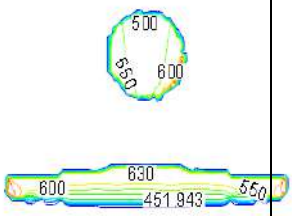
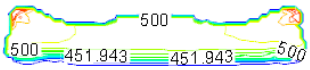
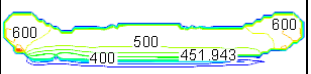


La figure IV.13 illustre les distributions de la pression le long de substrat au cours de l'étalement de la goutte.

La figure IV.13 illustre l'évolution de pression en fonction de température On remarque à l' instant t=0.00008 la pression prends la valeur maximal 400000 Pa et lorsque le temps augmente la pression converge vers une valeur constante proche de zéro.

IV.5. 3.Troisième cas 50 % d'air :

Tableau IV -4*:* distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C

			
0.1 ms	0.3 ms	0.5 ms	0.7 ms
			
1 ms	3 ms	7 ms	9 ms

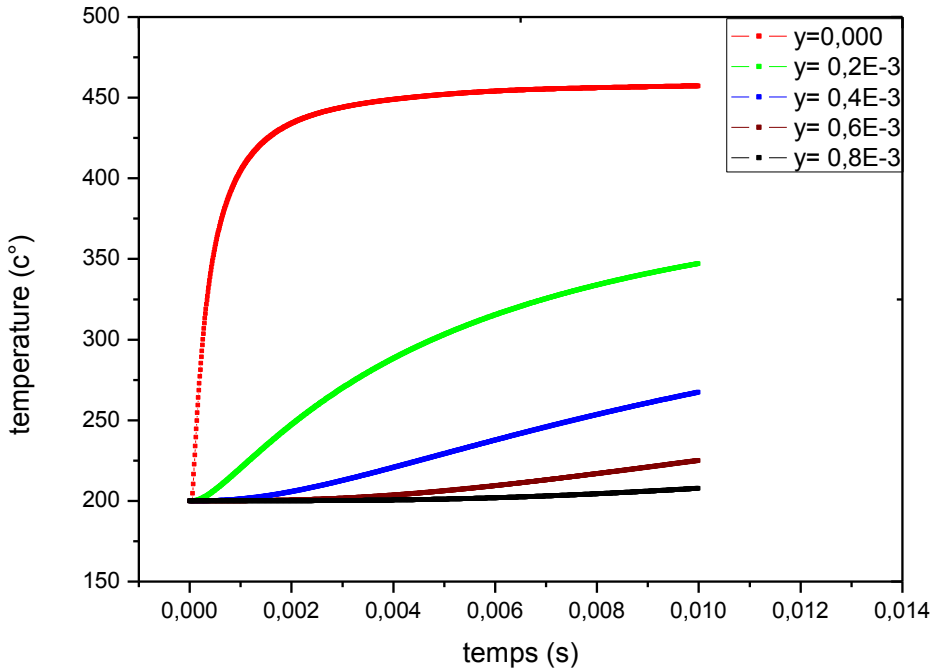


Figure IV.14 : profiles de température avec le temps dans le Troisième cas

La FigureIV.14 représente les profils de température pour cinq positions dans le substrat. On note que la température de substrat augment pour les cinq positions mais de diminution par apport la précédente.

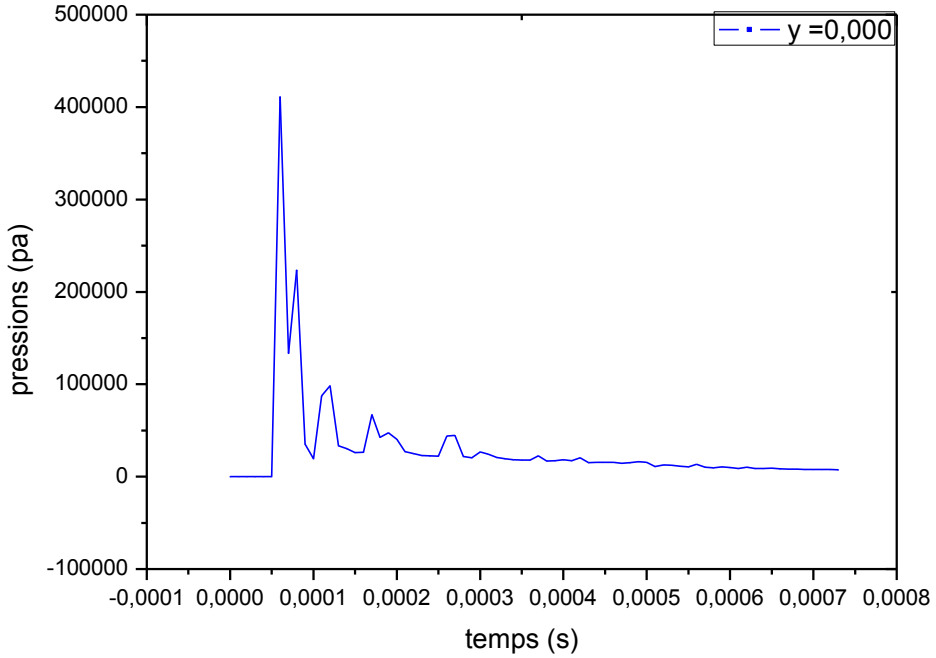
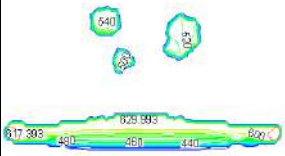
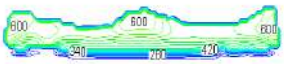
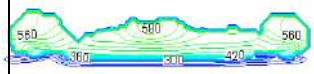


Figure IV.15:la variation de la pression au point d'impact Pour le Troisième cas

La figure IV.15 représente les résultats numériques des profils de pression le long de substrat, nous remarquons aussi, initialement la pression est plus élevée au point d'impact, qui produit une faible résistance de contact puis elle se désintègre vers zéro très rapidement.

IV.5.4.Quatrième cas 75 % d'air :

Tableau IV -5*:* distribution de la température lors de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat à une température de 200°C

			
0.1 ms	0.3 ms	0.5 ms	0.7 ms
			
1 ms	3 ms	7 ms	9 ms

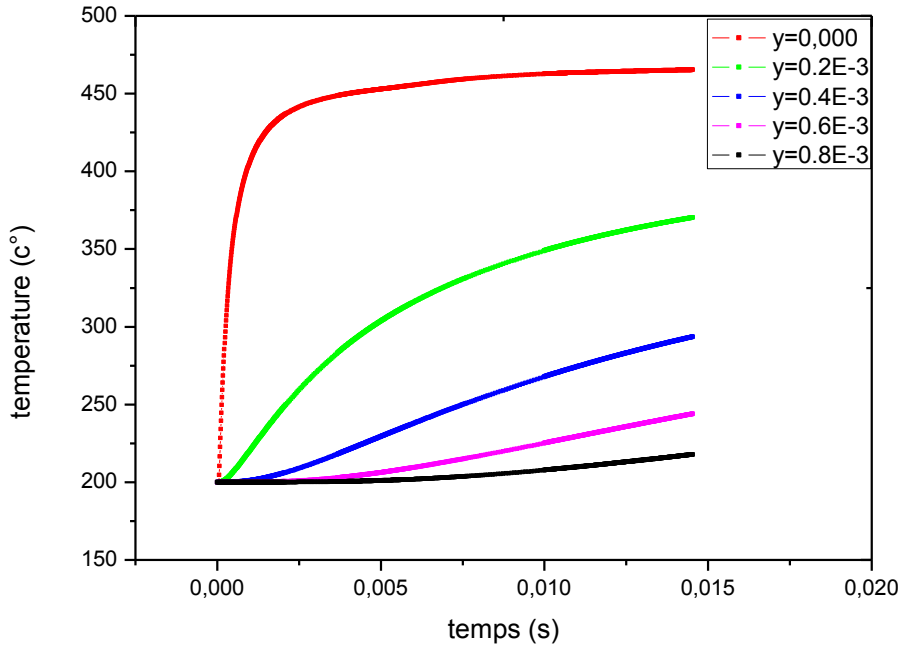


Figure IV.16 : profiles de température avec le temps dans le quatrième cas

Les FiguresIV.16: représentent les profils de température pour cinq position dans le substrat respectivement pour le cas d'une goutte On remarque que la température de substrat augmente. On constate également que la température de la goutte dans ce cas est plus faible que dans les cas précédents, expliquée toujours par le pourcentage plus important.

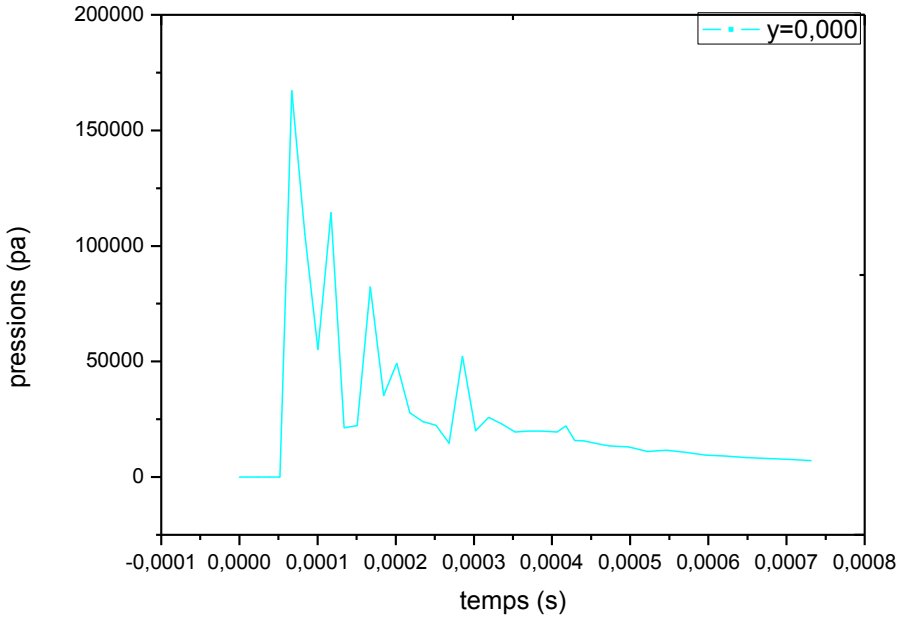


Figure IV.17 : la variation de la pression au point d'impact Pour le quatrième cas

La figure IV.17 représente les résultats numériques de la variation de pression le long du substrat, la pression de la goutte au point d'impact est moins importante que celle des autres cas, elle atteint 175KPa au moment d'impact.

IV.5.5.Comparaison entre les 4 cas :

Tableau IV.6 : Comparaison des profils de température des quatre cas :

	0%	25%	50%	75%
0.1				
0.3				
0.5				
0.7				

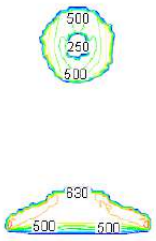
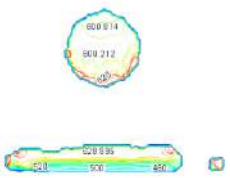
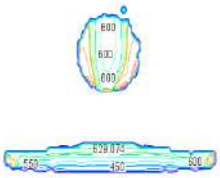
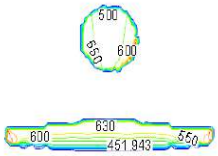
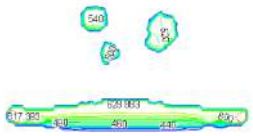
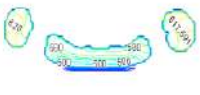
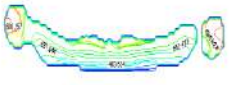
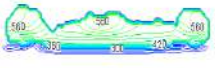
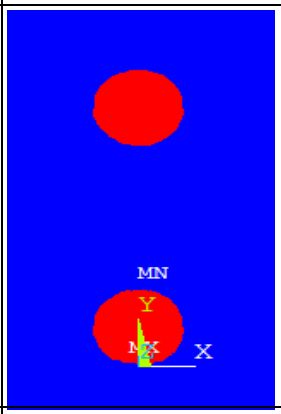
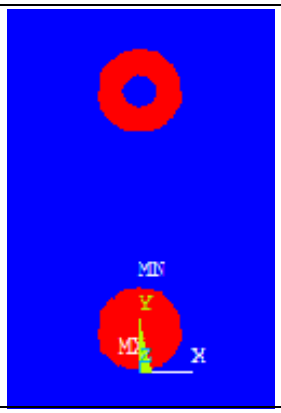
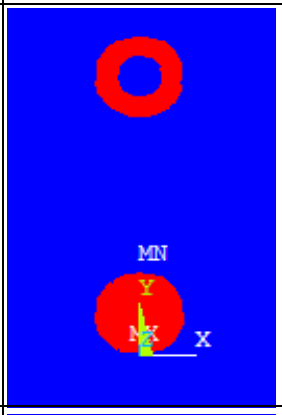
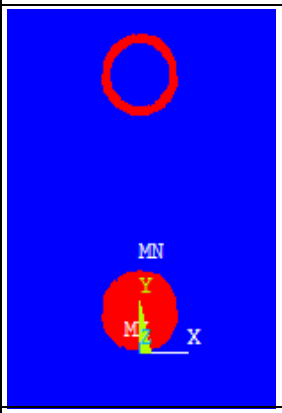
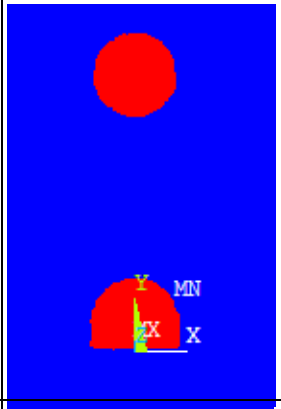
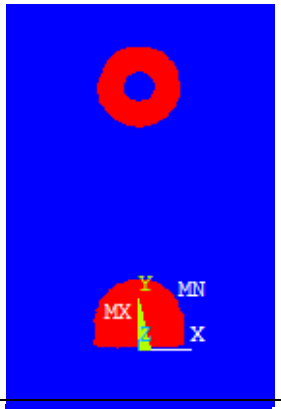
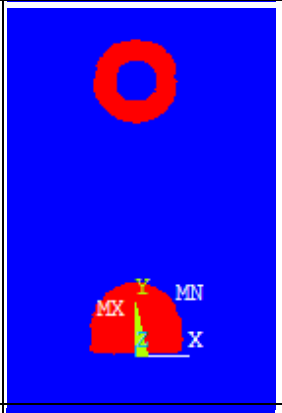
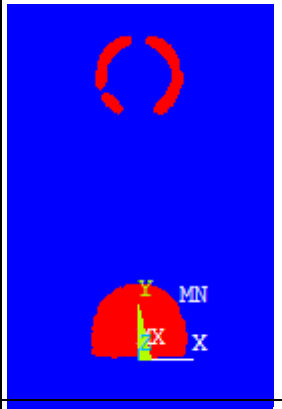
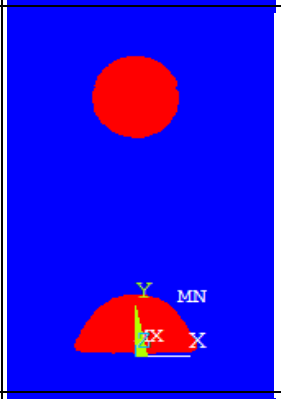
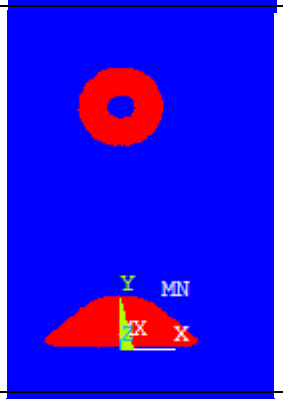
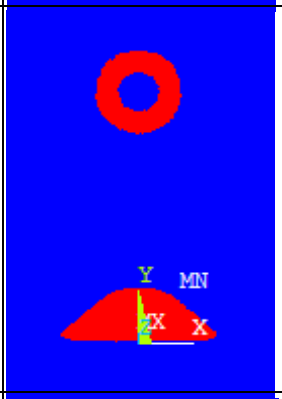
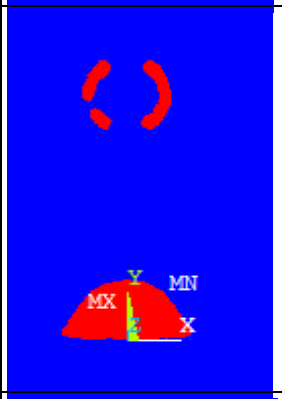
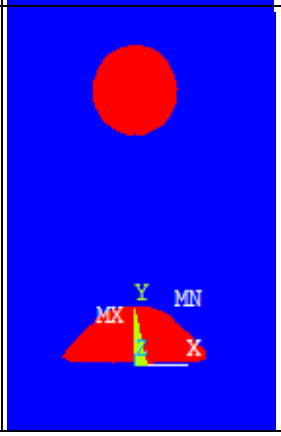
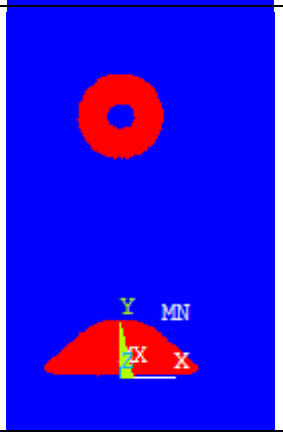
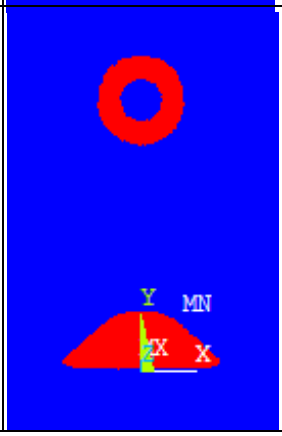
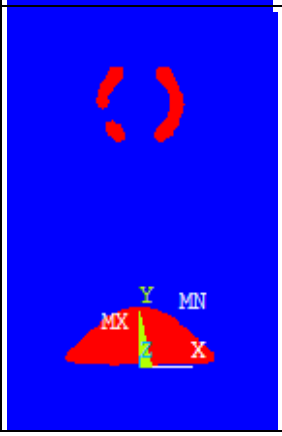
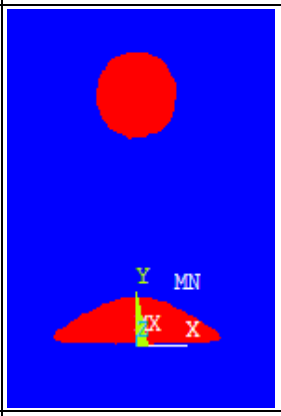
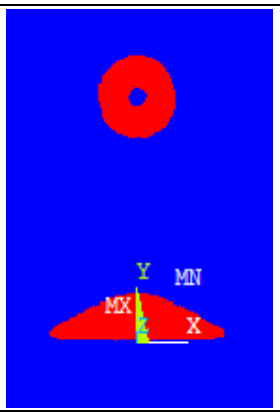
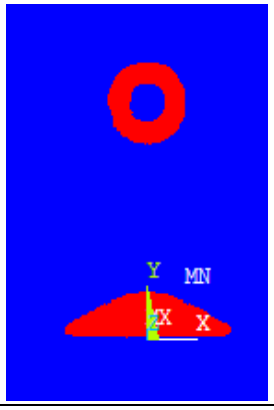
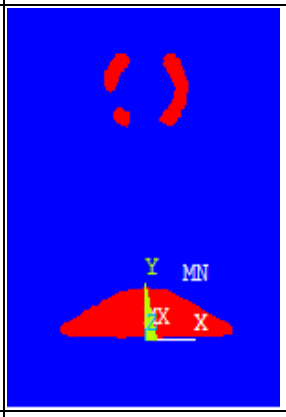
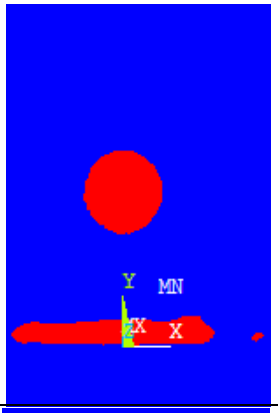
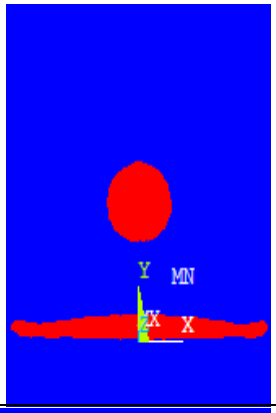
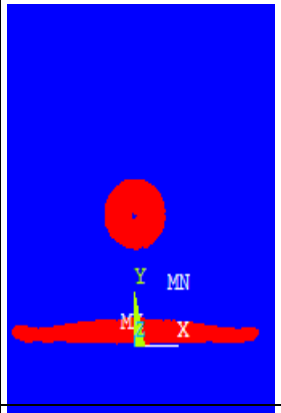
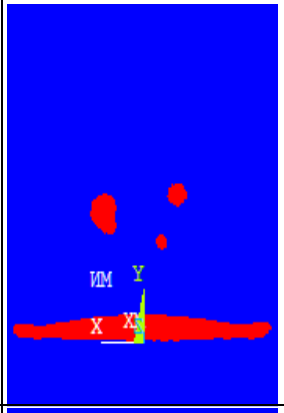
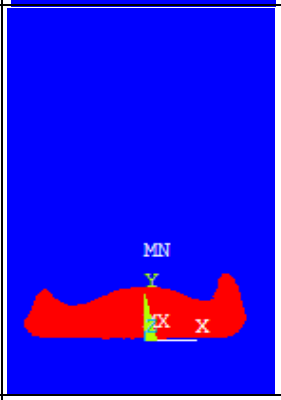
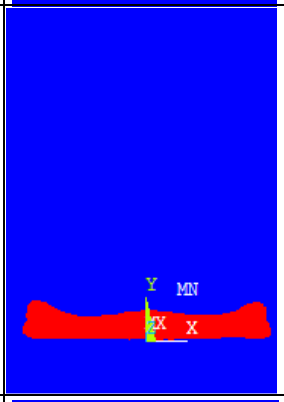
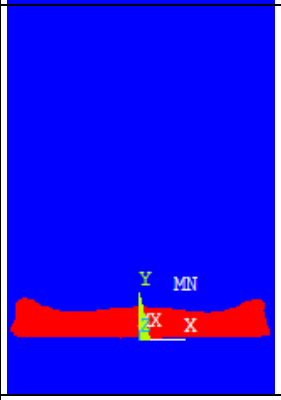
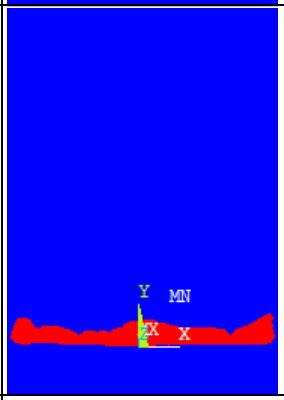
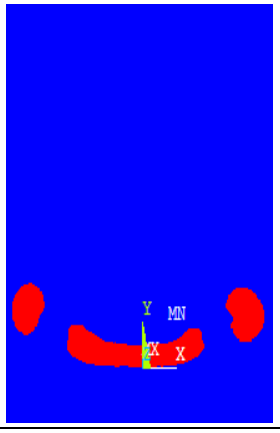
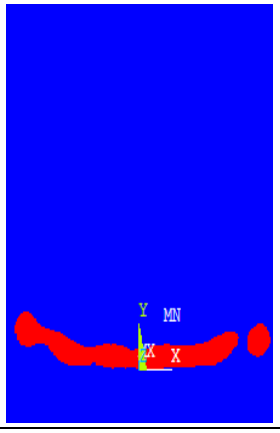
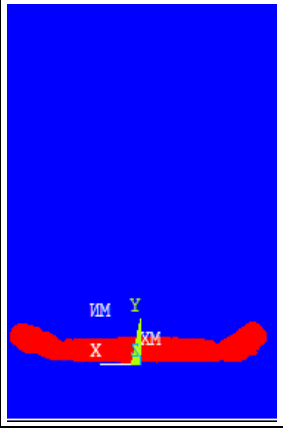
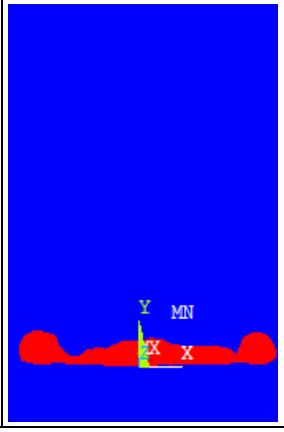
P 4	0%	25%	50%	75%
1				
3				
7				
9				

Tableau IV.7 : représentation spatial de la dynamique d'étalement pour les quatre cas étudiés

	0%	25%	50%	75%
0.1				
0.3				
0.5				
0.7				

	0%	25%	50%	75%
1				
3				
7				
9				

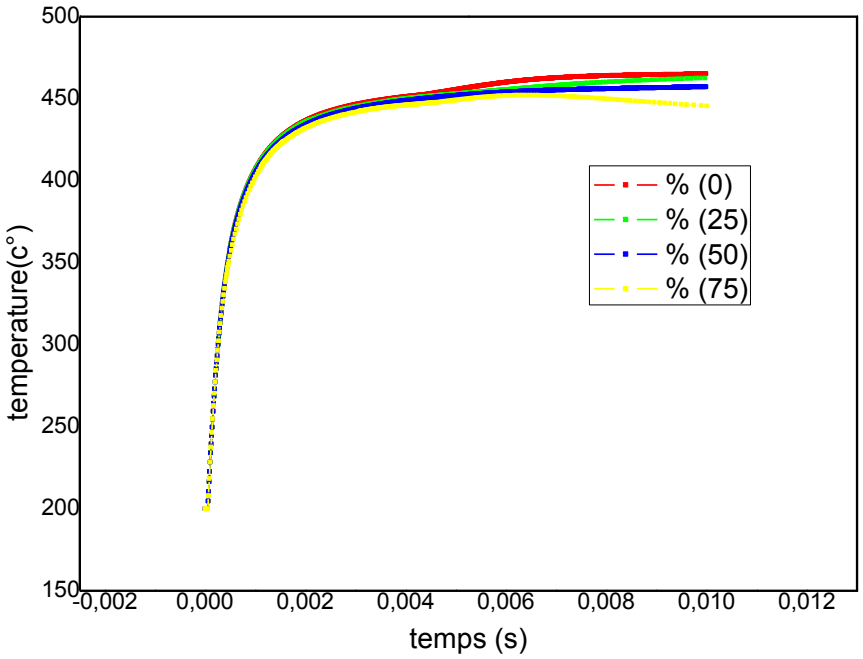


Figure IV.18 : Comparaison entre les profils de température avec le temps au point de contact pour les 4 cas.

La figure IV.18 :qui représente une comparaison des profils de température au point de contact entre les quatre cas. On note que la température de substrat augmente un peu plus dans le cas de 0% T=450°C que dans les deux autres cas 25% (T=450°C) et 50% (T=440°C). Et on note une température plus moins que dans 75% (T=430°C).

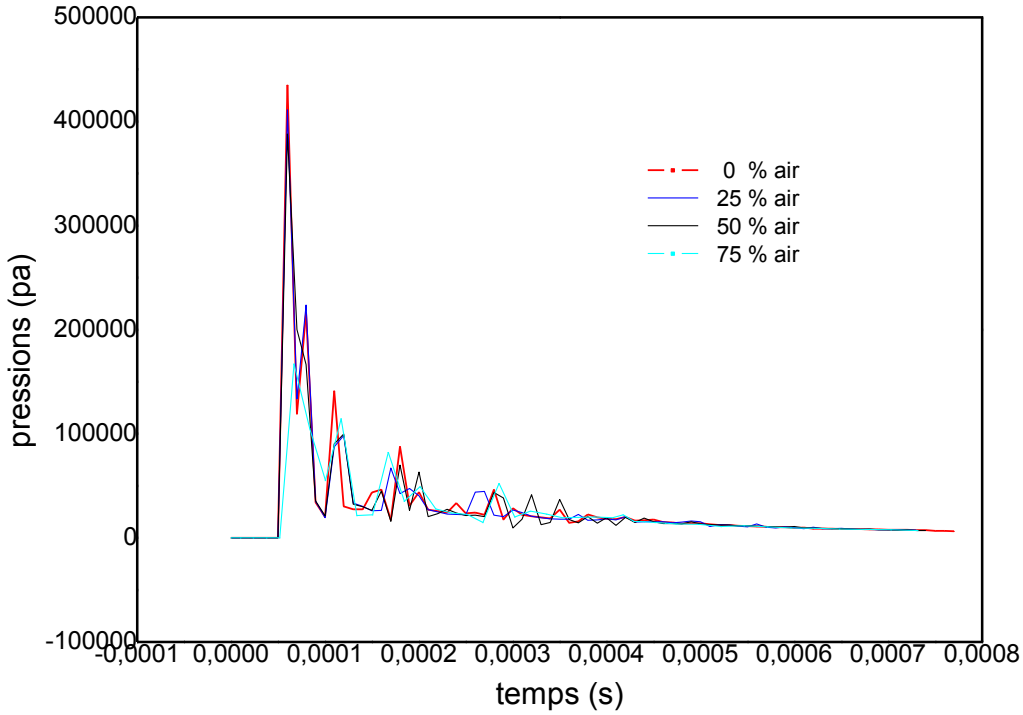


Figure IV.19: Comparaison de la variation de la pression au point d'impact Pour les quatre cas.

La figure IV.19 représente une comparaison des profils de pression au point de contact des quatre cas. Où il est clairement marquant que : au moment d'impact, l'augmentation de pression est différente pour les quatre de tel que P= 450000Pa pour 0%, P=400000Pa pour 25%, P=400000Pa pour 50% et P=175000Pa pour 75%.

IV.6.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a simulé numériquement l'impact successif des particules creuse sur un substrat avec l'utilisation de méthode VOF. Les principaux résultats, c'est-à-dire l'évolution de température ,de pression en fonction de temps, sont présentées dans ce chapitre. Les simulations numériques de facteur d'étalement montrent un très bon accord avec les résultats expérimentaux de Mostaghimi. La comparaison entre les deux phénomènes d'étalement, thermique et dynamique, sont présentées.

Apres l'analyse de résultat de simulation, on peut conclure :

Dans le premier et le deuxième cas, on constate l'éclaboussement des deux particules à cause de la fusion de la première dans la seconde et qui a provoqué une augmentation d'énergie cinétique.

Dans le troisième et quatrième cas (50 % -75 %), La pression a diminué par rapport aux cas précédents (0 %-25 %) et l'air à l'intérieur de la particule (en haut), n'as pas dégradée la formation de lamelle et la matière de la deuxième particule est facilement intégré dans le mécanisme d'étalement de la première particule.

Conclusion générale :

La pulvérisation des gouttelettes creuse sur un substrat en vue de la fabrication d'un revêtement fin est un procédé industriel largement utilisé.

Dans ce travail, notre objectif était d'étudier les phénomènes de la projection thermique de dépôts en aluminium ainsi que leurs propriétés reliées à l'impact de goutte (creuse et pleine) et également la solidification rapide d'une lamelle sur un substrat en acier.

Les simulations numériques avec Ansys 11 (VOF) sont réalisées en 2D afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, les principaux conclusions tires dans cette étude sont résumés comme suit :

• L'état de la goutte(creuse et pleine) joue important sur la morphologie de la lamelle.

• La variation du pourcentage d'air à l'intérieur de la goutte creuse donne un grande influence sur le temps de solidification.

• L'augmentation de pourcentage d'air, compensée par une diminution de la pression de contact (entre la goutte et la substrat) diminue fortement.

• Les températures du substrat et de la goutte sont inversement proportionnelles à cause du transfert de chaleur.

• L'éclaboussement des deux particules (creuse et plein) à cause de la fusion de la première dans la seconde et qui a provoqué une augmentation d'énergie cinétique.

Les perspectives de ce travail concernent la mise en place de la simulation en 3D de L'impact d'une goutte successif des particules d'alumine creuse sur substrat d'acier.

[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 .

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

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

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

[13] Weston M. Stacey. (ed.), "Fusion Plasma Physics". WILEY-VCH Verlag GmbH &Co. Georgia, 2005.

[14] M.I Boulos., W.H Gauvin, « Powder processing in a plasma jet : a proposed model », the Canadian journal of chemical Engineering, V. 52, June (1974).

[15] mémoire de magister- djeghdjough mohamed-juin2010-(Effet de la température de préchauffage du substrat sur l'adhérence des revêtements déposés par torche à flamme.

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

[17] X. Wang, D. Zhuang, Effect of Atomising Gas Pressure on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp587-592.

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

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

[20] 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.

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

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

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

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

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

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

[27] Martine Coddet-LERMPS-Université de technologie de Belfort-Montbéliard

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

[29] V.V. SOBOLEV, J.M. GUILEMANY, Oxidation of coatings in thermal spraying, Materials Letters 37, 1998, p.231-235.

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

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

[32] Escure C., Vardelle M., Vardelle A., and Fauchais P., (2001)"Visualization of the Impact of Drops on a Substrate in Plasma Spraying Deposition and Splashing Modes", Thermal Spray, New Surface for a New Millenium, C.C. Berndt, K.A. Khor, and E.F. Lugscheider, ed, ASM International, Materials Park, OH, pp. 805-12.

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

[34] H. Fukanuma, in: C.C. Berndt (Ed.), Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, Cincinnati, U.S.A., October 7– 11, 1996, 9th National Thermal Spray, Conference proceeding, ASM International, 1996, p. 647.

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

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

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

[38] M. Pasandideh-Fard, V. Pershin, S. Chandra, J. Mostaghimi (2002) J Therm Spray Techno11:206

[39] Bussmann M, Mostaghimi J, Chandra On a three-dimensional volume tracking model of droplets, Physics of Fluids, 11, 1999, pp 1406-1417.

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

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

[42] Zirari Mounir «Modélisation de la construction d'un dépôt par projection thermique : de la formation d'une lamelle à l'empilement des couches thèse de doctorat, université Saad dahlab, Blida ; Algérie.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[52] F. H. Harlow and J. P. Shannon. " The splash of a liquid drop". J. Appl. Phys, 38 (10) :3855.3866, 1967.

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

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

[55] V.V .Sobolev, Formation of splat morphology during thermal spraying. Materials Letters, vol. 36, p, 123-127, 1998.

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

[56] 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.

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

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

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

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

[61] L. Bianchi, Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques : mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts, Thèse de l'Université de limoges, 1995.

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