REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia FARES de MÉDÉA



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

En Génie Mécanique

Option : Energétique et thermique des systèmes

THEME

Simulation numérique de l'impact des gouttelettes de métal creuses sur une surface incliné

Présentée par :

- GUIT M'hamed.
- LOUNES Boualem.

Proposé et dirigé par :

- Dr ZIRARI Mounir

Co-promoteur :

- MOHRI Abdenour

Promotion 2012/2013

Remerciements

- ***Avant tout nous remercions « Allah » de nous avoir accordé des connaissances de la science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.***

- ***Nos vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.***

- ***Nos remerciements s'adressent aussi à notre encadreur Dr Zirari Mounir***

- ***Nous tenons à remercier particulièrement monsieur MOHRI Abdennour, notre Co-Promoteur pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutien.***

- ***Nous n'oublierons pas la sympathie et le soutien de toutes les personnes que nous avons pu côtoyer au cours de ces années.***

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes très chers parents qui m'ont aidé durant toutes mes études

A mes chers frères et chères sœurs et aussi à toute la famille Lounes, et Guit.

ainsi que tous mes proches.

A tous mes amis sans exceptions.

Sommaire :

Introduction générale

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie……2

I.1 Projection thermique……...2

I.2 Les différentes techniques de projection thermique……..3

I.2.1 Les procédés de projection à la flamme……...4

I.2.1.a. La projection flamme-poudre……...4

I.2.1.b. La projection flamme-fil……...5

I.2.1.c. La projection par flamme hypersonique……..5

I.2.1.c.1. Canon a détonation ……..6

I.2.1.c.2 Flamme oxyfuel a haute vitesse (HVOF)……...6

I.2.2 Projection par arc électrique……7

I.2.2.a. la projection arc-fil……...7

I.2.2.b. la projection par plasma d'arc……..7

I.3 Comparaison des procédés……..8

I.4 Principe de fonctionnement de la torche……9

I.5 L'arc électrique……..10

I.5.1 L''ecoulement du jet de plasma……12

I.5.2 Les gaz plasmagènes……..13

I.5.3 Distance de tir……14

I.5.4 Vitesse de l'écoulement……..15

I.6 Transfert de chaleur plasma-particules……..15

I.7 Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat……16

I.7.1 Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat……17

I.7.2 Etalement de la particule……...18

I.7.3 Solidification des lamelles……....19

I.8 Caractéristiques microstructurales des revêtements…….20

I.8.1. Dépôts d'alumine…….……..21

I.9. Substrat…….……...22

I.9.1.Préparation de substrat……...22

I.9.2.Construction du dépôt…….....22

I.9.3.Phénomènes d'oxydation……..23

I.9.3.a. Oxydation des gouttelettes en vol……..……..23

I.9.3.b. Oxydation lors de la formation du dépôt……..……...24

I.10.Caractéristiques du dépôt……25

I.10.1. Microstructure…….…...25

I.10.2 Teneur en oxydes et porosité…….…….....25

I.10.3. Adhérence et dureté ……25

I.10.4. Resistance à la corrosion……26

I.10.5. Usure……..26

Chapitre II : Modélisation mathématique

II.1. Introduction……28

II.2. Modèle dynamique……..28

II.2.1. Modélisation de l'écoulement des fluides……29

II.2.1.1. L'équation de la continuité……..29

II.2.1.2. L'équation de quantité de mouvement…….……...……29

II.2.1.3. Équation de l'énergie…….……...30

II.3. Modèle thermique…….……..30

II.3.1. Transfert de chaleur avec changement de phase……..……30

II.3.1.1. Méthode à grille mobile……..……31

II.3.1.2. Méthode à grille fixe……..……..31

II.3.1.2.a. Méthode d'enthalpie……..……..32

II.3.1.2.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente…….……33

II.3.2. Modèle thermique utilisé…….……33

II.4.Calcul d'interfaces……..34

II.4.1. Les méthodes de suivi de front……..35

II.4.1. Les méthodes de suivi de front……36

II.4.2. Les méthodes de suivi de volume……...……36

II.4.3. La Méthode VOF CIAM…….37

II.5. Conclusion……..40

Chapitre III : Modélisation numérique

III.1. Introduction……..……..41

III.2. Résolution numérique……..……..41

III.3. Discrétisation des équations……41

III.4. Résolution des équations par éléments finis……..42

III.4.1. Méthodes des éléments finis……...……...42

III.4.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis……..…….……43

III.4.2.1. Formulation variationnelle forte……..……..43

III.4.2.2. Formulation variationelle faible…….……..43

III.4.3. Forme généralisée des équations du système et discrétisation……..44

III.4.3.1. Terme temporelle…….……45

III.4.3.2. Terme d'advection…….……46

III.4.3.2.1. Monotone Streamline Upwind Approach (MSU).....46

III.4.3.2.2. Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin).....48

III.4.3.2.3. Approche Colloquée De Galerkin (COLG)……. ……..49

III.4.3.3. Terme de Diffusion…….……..49

III.4.3.4. Termes source…….……..50

III.5. Conclusion……50

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 ANSYS……...51

IV.2 Description du domaine d'application……53
IV.3 Matériaux utilisés……...54
IV.3.1 l'aluminium……..…….…….54
IV.3.2 propriétés des particules à l'impact…….…….55
IV.4 impact d'une particule d'aluminium totalement fondus…….……..57
IV.4.1. Substrat incliné 15°……...…….59
IV.4.2. Substrat incliné 30°…….63
IV.4.3. Substrat incliné 45°…….……68
IV.5 Comparaison des Résultats……72
Conclusion générale
Références bibliographiques

Liste des figures

Figure I.1 : Différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie, **[5]**…… …….2
Figure I.2 : Principe fondamental de la projection thermique, **[2]**……..3
Figure I.3 : Schéma du principe d'un pistolet flamme-poudre, **[2]**……4
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil, **[2]**……5
Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation, **[2]**……6
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu, **[2]**……6
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un pistolet arc-fil, **[2]**……7
Figure I.8 : Schéma du principe de la projection par plasma d'arc **[5]**……...8
Figure I.9: Principe de fonctionnement d'une torche plasma, **[2]**……...9
Figure I.9-a : torche à plasma à écoulement laminaire (E électrode, T tuyère), **[8]**……..10
Figure I.9-b : torche à plasma à écoulement en vortex (I insert), **[8]**……10
Figure I.10 : Représentation des différentes zones de développement de l'arc électrique selon *M.P. Planche*. **[10]** ……...10
Figure I.11 : Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc **[9]**……..11
Figure I.12 : Description schématique du processus d'engouffrement **[19]**……..12
Figure I.13 : Propriétés des principaux gaz plasmagènes utilisés en projection plasma **[20]**……...13
Figure I.14 : Influence de l'intensité sur la vitesse maximale du gaz à 4 mm en sortie de tuyère (a) Mélange binaire Ar/H2, **[25]**. (b) Mélange ternaire Ar/He/H2, **[21]**.....14
Figure I.15 : Schématisation du transfert de chaleur plasma- particule **[30]**……16
Figure I.16 : Modes d'impact **[33]**……17
Figure I.17 : Schéma d'écrasement de la particule **[6]**……..18
Figure I.18 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma **[30]**……19
Figure I.19 : Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) du dépôt d'alumine élaboré à 573 K **[6]**……...21
Figure I.20 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique **[85]**……23
Figure I.21 : Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette **[58]**……24
Figure I.22 : Schéma de principe de l'usure abrasive**[85]**……27
Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon **[86]**……...28
Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température **[92]**……32
Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface **a)** méthode Lagrangienne**, b)** méthode Eulérienne**, [93]**……..34
Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de front **a)**marqueur de surface, **b)** fonction de hauteur, **c)** méthode de ligne de niveau, **[95]**……35
Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque **a)** Méthode de marqueur de volume **b)** Schémas TVD **c)** Méthode de volume de fluide (VOF) **[96,97]**..36
Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret **[98]**……...37
Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique **[99]**……38
Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps **[86]**……...39
Figure III.1 : Approche de ligne de courant d'Upwind **[105]**……...47
Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS ……...52
Figure IV.2 : impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C……..57
Figure IV.3: comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions……...58
Figure IV.4 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat incliné 15° à 200°C avec une vitesse de 3m/s……60
Figure IV.5 : comparaison entre les facteurs d'étalement des deux cas pour substrat incliné 15°…...60
Figure IV.6 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux cas incliné 15°……...61

Figure IV.7 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 15° à 200 C° pour une particule normale totalement fondue……..61
Figure IV.8 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 15° à 200 C° pour une particule creuse totalement fondue……62
Figure IV.9 : Résultats de simulation pour les profiles de température au point d'impact dans les deux formes sur substrat incliné15°……63
Figure IV.10 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat incliné 30° de 200°C avec une vitesse de 3m/s...……..64
Figure IV.11: comparaison entre les facteurs d'étalement des deux cas pour substrat incliné 30°…..65
Figure IV.12 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux cas incliné 30°……66
Figure IV.13 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 30° pour une particule normal totalement fondue…….66
Figure IV.14 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 30° pour une particule creuse totalement fondue……..67
Figure IV.15 : Résultats de simulation pour les profiles de température au point d'impact dans les deux formes sur substrat incliné 30°……..……67
Figure IV.16 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat incliné 45° de 200°C avec une vitesse de 3m/s……..……69
Figure IV.17: comparaison entre les facteurs d'étalement des deux cas pour substrat incliné 45°….69
Figure IV.18 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux cas incliné 45°…….……70
Figure IV.19: profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 45° pour une particule normal totalement fondue…….……70
Figure IV.20 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 45° pour une particule creuse totalement fondue……..……71
Figure IV.21 Résultats de simulation pour les profiles de température au point d'impact dans les deux formes sur substrat incliné 45°…….…..71
Figure IV.22: Comparaison entre les facteurs d'impact dans chaque forme pour les trois cas……72

Liste des tables

Tableau I.1 : Caractéristiques moyennes des différents procédés de projection Thermique **[6]**……..…8
Tableau I-2 : Propriétés de dépôts de NiCrAlY réalisés sous air à des distances de tir de 100mm et 150mm (250A, 38V) **[26]**…….……..… …….15
Tableau III.1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[105]**.....44

Résumé :

Malgré de nombreux travaux théoriques et expérimentaux traitant l'impact des gouttelettes de métal sur le substrat pendant le processus de revêtement par projection thermique .la dynamique de l'impact des gouttelettes creuse et la formation subséquente du lamelle ne sont pas bien pris en compte .dans cette étude, on propose d'étudier l'impact dynamique des gouttelettes creux conjugué aux paramètres contrôlant la formation d'une lamelle ainsi que l'inclinaison du substrat .la gouttelette creuse est modélise de telle sorte qu'elle se compose d'une enveloppe de liquide enfermant une cavité de gaz. Le modèle d'impact estime la dynamique d'écoulement et le passage lors de l'impact (d'étalement et de la solidification de la goutte) a l'aide du la méthode (VOF) couplé à un modèle de solidification.

Mots clés :

- *Impact, goutte, métal, solidification, lamelle, simulation numérique, élément finis : VOF : Ecoulement Modélisation ANSYS*

Abstract

In spite of many theoric and experimental treating the impact of small drops of metal on the substrate during the process of the regarment by thermal projection, the hollow dynamic of small drops impact and the subsequent formation of the little blade are not taken in consideration. In this analysis, are purpose to study the hollow dynamic impact of small drops united to the parameters checking the formation of small blade as well as tilting of substrate. The small drops are modelised so that is composed of liquid quantity locking a whole of gas up. The impact model esteems the dynamic of the impact (staggering, solidification of the drop). By helping of the method (VOF) coupled to the solidification model.

Keywords:

- *Impact, Drop, metal, solidification, scale, numeric simulation, finished element, VOF, flow, modelisation, ANSYS.*

ملخص :

على الرغم من العديد من الأعمال النظرية والتجريبية التي تتناول تصادم قطرات معدنية مع الركيزة خلال عملية طلاء الرش الحراري.ان ديناميكية تصادم القطرات الجوفاء لتشكيل صفيحة لا تؤخذ في الاعتبار. في هذه الدراسة ، نقترح دراسة تأثير ديناميكية قطرات جوفاء مرتبطة بالعوامل المسيطرة على تشكيل صفيحة والميلان الركيزة. القطيرة الجوفاء تتكون من مغلف سائل يحوي تجويف الغازي .ان نموذج التصادم يقدر ديناميكية جريان لحظة التصادم (انتشار و التصلب القطيرة) اعتمادا على طريقة (VOF) بالإضافة إلى نموذج التصلب.

مفاتيح:

التصادم , قطيرة , تصلب , صفيحة , المحاكاة الرقمية , العناصر المحددة , (VOF) جريانANSYS

Introduction générale

Introduction générale

La technologie de projection thermique est une solution éprouvée et reconnue pour des applications mécaniques, thermiques, anti-usure, anti-corrosion et de génie électrique les plus diverses. Bien que d'application courante depuis trente ans dans les domaines aéronautique et spatial ainsi que nucléaire, elle n'est présente que maintenant dans le secteur de l'automobile, des textiles, de la chimie, de la pétrochimie, de l'électronique et du biomédical.

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

La réalisation de revêtement par pulvérisation de fines gouttelettes sur la surface à recouvrir est un sujet à de plus en plus de recherches. Afin de comprendre la morphologie de l'impacte de la goutte sur le substrat il est intéressent d'éxaminer les phénomènes dynamiques et thermiques à l'échelle de ces gouttes qui vont créer la fine couche.

Cependant ces couches ne sont pas toujours formées de manière parfaite des défauts de dépôt tels que les fissures peuvent être par fois observés.

Dans cette étude ou s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de l'impact dynamique couplé au refroidissement avec solidification, pour se faire nous avons choisi des particules en aluminium totalement fondues. ayant deux formes différents normale et creuse (bulle d'air), sur un substrat lisse en acier inoxydable incliné à trois angle respectivement 15°,30°et 45°.

Notre travail est présenté en quatre chapitres :

- Le premier chapitre consiste en un rappel bibliographique sur la projection thermique est ces différents procédés, l'écoulement du jet plasma ainsi que l'impact, l'étalement et la solidification de la lamelle il concerne également les caractéristique du dépôt.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié.

- Le troisième chapitre est dédié à la résolution numérique et les méthodes de calcul.

- Dans le dernier chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact de gouttes (**normale** et **creuse**) sur un substrat incliné 15°,30°puis 45°obtenus par le code de calcule ANSYS.

Notre travail se termine par une conclusion générale suivie d'une proposition des perspectives.

Chapitre I :

Etude bibliographique

Les céramiques peuvent être utilisées pour constituer des pièces massives. Cependant, ces pièces ont un coût de production élevé et sont très fragiles. Ceci explique le développement, depuis ces vingt dernières années, des techniques de dépôt de céramique sur les matériaux. Elles permettent de conférer à un matériau (généralement métallique) les propriétés de surface d'une céramique tout en conservant ses propriétés internes.

La projection thermique est parmi les principaux procédés industriels actuellement développés et utilisés pour élaborer les revêtements céramiques.

I. Différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie

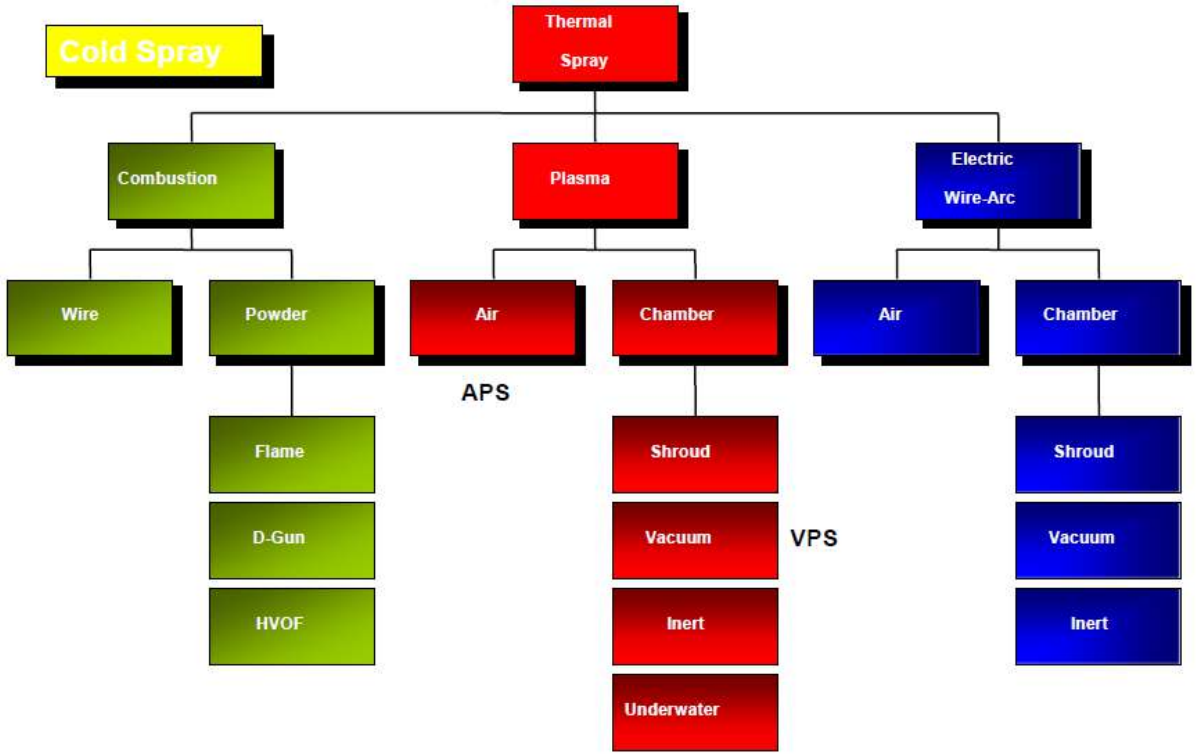


Figure I.1 : Différents procédés de projection thermique utilisés dans l'industrie **[5]**

I.1.Projection thermique

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

Principe général

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur pour fondre et accélérer un matériau. Celui-ci prend alors la forme de particules pâteuses ou liquides qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilements successifs

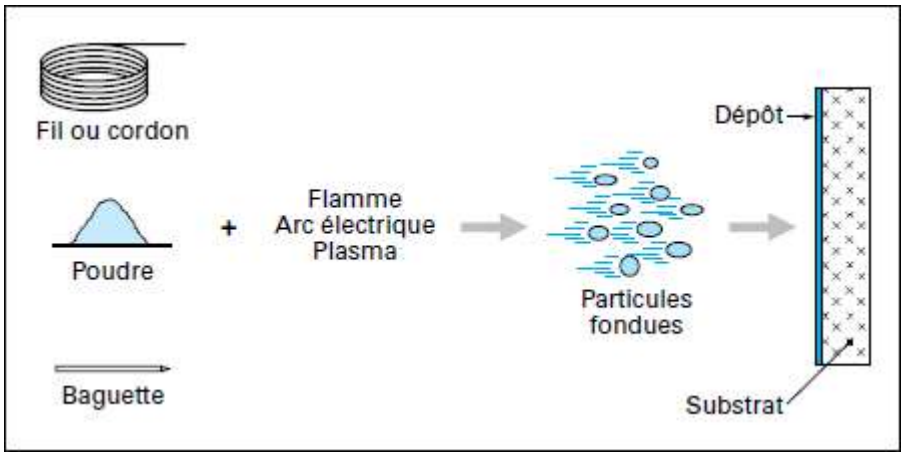


Figure I.2 : Principe fondamental de la projection thermique **[2]**.

La (figure I.2) présente le principe général de la projection thermique : la matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (arc électrique, flamme, plasma). Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir. En principe, tout matériau dont la température de fusion d'au moins 300 °C de la température de décomposition ou de vaporisation peut être projeté et le substrat peut être maintenu à une température inférieure à 150 °C pendant l'opération de déposition. L'épaisseur du dépôt constitué par l'empilement de lamelles est généralement comprise entre 50 µm et quelques millimètres **[2]**.

I.2. Les différentes techniques de projection thermique

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention du Schoop portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur **[1]**, puis le plomb à poudre à travers une flamme. Les applications industrielles ont débuté en 1914, d'abord dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), puis dans ceux de l'anticorrosion (dépôt d'aluminium) et de la décoration (dépôt de bronze) **[2]**. Ensuite, la recherche de propriétés de surface spécifiques pour des pièces utilisées dans les conditions de plus en plus sévères, en particulier dans les industries aéronautiques et mécaniques, a conduit au développement de nouveaux procédés de projection thermique (plasma, canon a détonation, flamme hypersonique (HVOF)) et de nouveaux dépôts (alliages métalliques, céramiques, composites…).

Les propriétés du dépôt dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat.

Les paramètres des particules à l'impact sont : leur vitesse, leur température, leur état de fusion, leur taille, leur état chimique. Ces derniers dépendent des caractéristiques de l'écoulement plasma et des conditions d'injection de la poudre dans celui-ci.

Les paramètres du substrat sont sa nature, sa rugosité, son état chimique de surface et sa température avant, pendent et après le tir.

On peut séparer les procédés de projection thermique en deux familles selon la source de chaleur utilisée : flamme ou arc électrique.

I.2.1. Les procédés de projection à la flamme

La projection à la flamme est simple et moins couteuse. Ce type de projection utilise l'énergie d'une réaction chimique. Pratiquement tous les matériaux dont la température de fusion est inférieure à 2300 °C, peuvent être projetés par cette technique. Ce sont en général des métaux, des alliages, ou certaines céramiques qui se présentent sous forme de fil, de barreau, ou de poudre.

Il ya trois sortes de procédés : la projection flamme-poudre, la projection flamme-fil et la projection par flamme hypersonique.

I.2.1.a. La projection flamme-poudre

Elle consiste à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxycombustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par la réaction chimique entre l'oxygène et un gaz carburant de combustion (figure I.3). La température de fusion des matériaux utilisés doit être inférieure à la température de la flamme (T_{fusion} = 0,6-0,7 T_{flamme}). En raison de la faible vitesse des particules projetées, de l'ordre de 30 à 50 m/s, les dépôts obtenus présentent généralement une faible adhérence (20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20%) par rapport aux dépôts obtenus avec d'autres techniques de projection. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudres aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondu. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques millimètres d'épaisseur, à des taux horaires d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat **[3, 2]**.

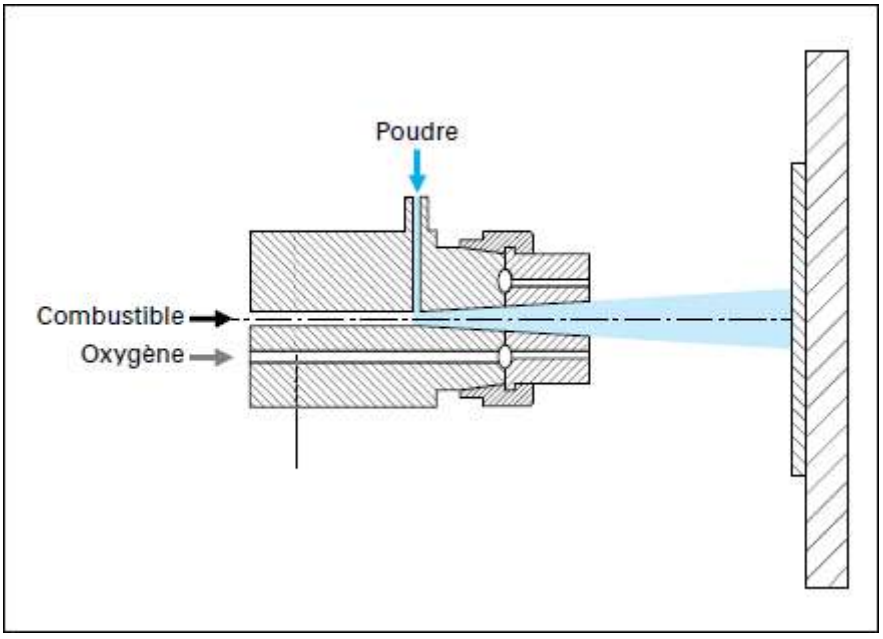


Figure I.3 : Schéma du principe d'un pistolet flamme-poudre **[2]**.

I.2.1.b. La projection flamme-fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme est uniquement utilisée pour tendre le matériau d'abord, introduit sous forme de fil, de barreau ou de cordon en son centre (figure I.4). La projection des gouttelettes sur le substrat est assurée par un jet de gaz comprimé qui atomise le matériau fondu. La vitesse des particules est plus élevée (environ 150m/s). Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme (T_{fusion} = 0,95 T_{flamme}). Cette technique permet de projeter des métaux (Al, Cu, Ni), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al_2O_3, Al_2O_3-T_iO_2, Z_rO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

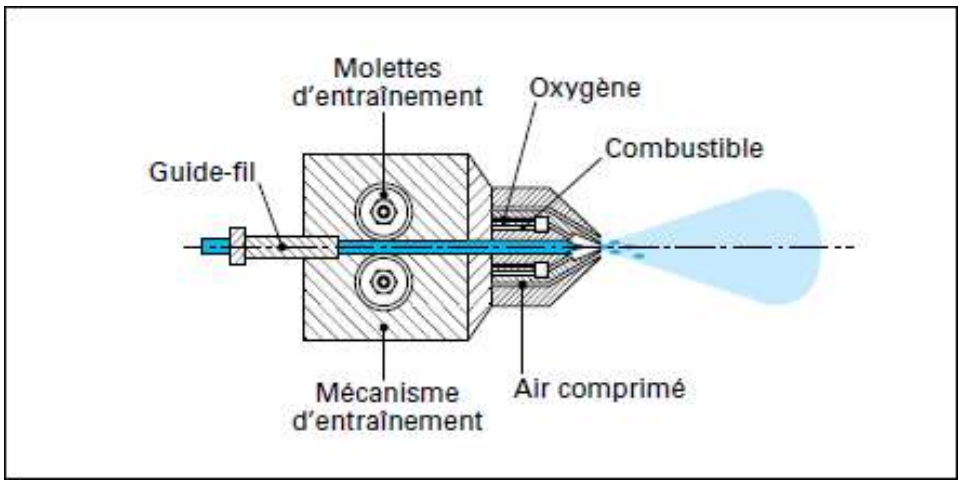


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil **[2]**.

I.2.1.c. La projection par flamme hypersonique

Ce type de projection utilise la combustion sous pression d'un carburant sous forme gazeuse (propane, propylène, acétylène, hydrogène) ou liquide (kérosène) avec de l'oxygène ou éventuellement de l'air en particulier pour le kérosène. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion à des pressions allant jusqu'à 1 MPa ce qui augmente légèrement la température de combustion. La chambre est refroidie par une circulation d'eau. La flamme est ensuite accélérée dans une tuyère et acquière à la sortie de celle-ci une vitesse supersonique. La poudre à projeter est soit propulsée sous pression dans l'axe du jet (injection en amont de la tuyère) soit injectée au voisinage en aval de la tuyère à une pression proche de la pression atmosphérique. Les vitesses acquises par les particules peuvent atteindre 600 à 700 m/s et les dépôts réalisés présentent une bonne adhérence (de 70 à 100 MPa) et une faible porosité (2%). Les matériaux projetés sont essentiellement des cermets (WC-Co, Cr3C7-NiCr), des métaux, des alliages métalliques auto-fusibles ou non **[4]**.

Deux procédés présentent ce type : la projection hypersonique à tir discontinu (canon a détonation), et celle à tir continu (HVOF).

I.2.1.c.1. Canon a détonation

Cette technique utilise l'énergie de détonation d'un mélange généralement constitué d'oxygène et d'acétylène pour projeter les particules à déposer sur le substrat. Le matériau est introduit dans le tube qui constitue le canon à détonation, en même temps que le mélange combustible (figure I.5). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence d'environ 8 allumages par seconde. La poudre est chauffée et éjectée à très grande vitesse (600 à 900 m/s) vers le substrat par l'onde de choc créée. Entre chaque tir, le tube est balayé par un jet de gaz neutre (argon). Des températures supérieures à 3300 °C sont atteintes par les gaz brulés suivant l'onde de choc. Ce procédé est essentiellement utilisé pour réaliser les dépôts de cermets (WC-Co, …) ou de céramique (Cr_2O_3, Al_2O_3, …).

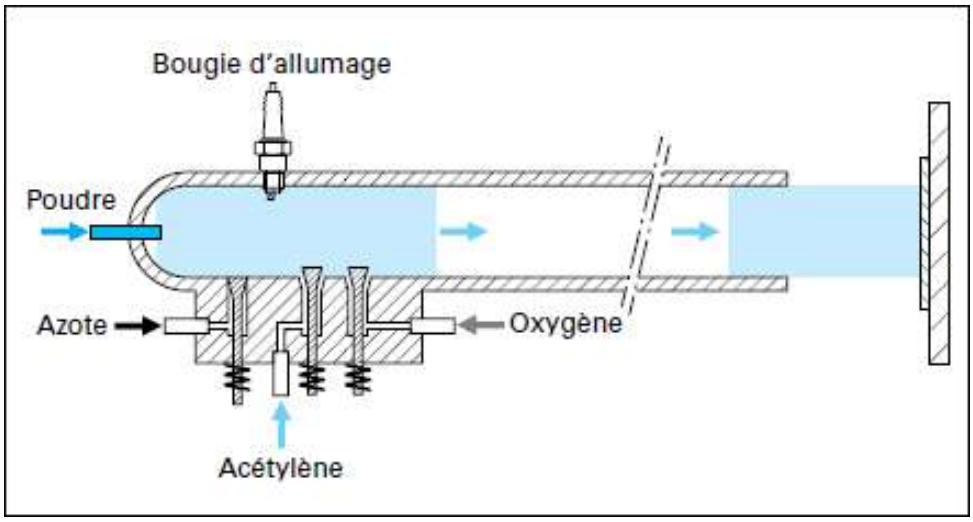


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation **[2]**.

I.2.1.c.2 Flamme oxyfuel a haute vitesse (HVOF)

Cette technique a été développée dans les années 80. Le principe est basé sur une réaction de combustion à haute pression (5.10^5 à 7.10^5 pa) dans une chambre à combustion. Les vitesses de flamme et des particules en sortie de tuyère sont très élevées (jusqu'a 700m/s).L'HVOF utilise la combustion de l'oxygène avec un carburant comme le propane, le propylène, le tétère, l'hydrogène ou le kérosène. Un procédé comparable, (figure I.6). Ces procédés de projection sont principalement utilisés pour projeter des alliages métalliques et des carbures.

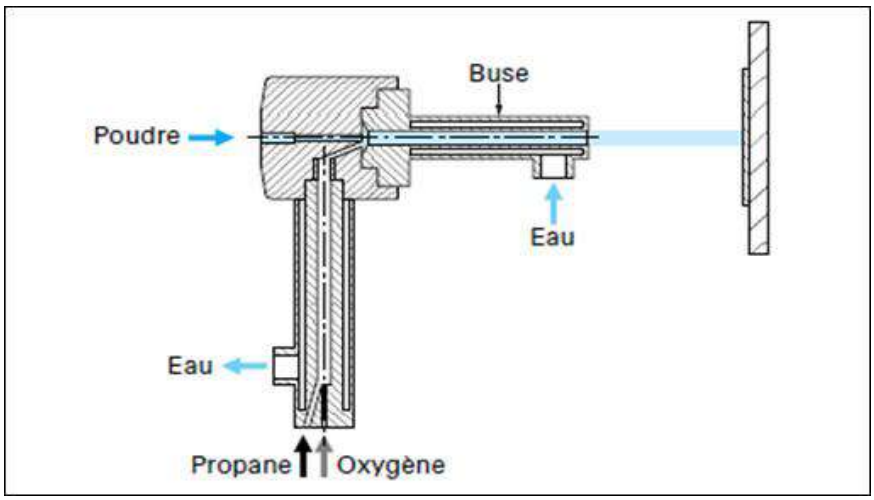


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu **[2]**.

I.2.2. Projection par arc électrique

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

I.2.2.a. la projection arc-fil

Le principe de cette technique consiste à amorcer un arc électrique entre deux électrodes consommables sous forme de fil (figure I.7). 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 **[4]**. Mais également des superalliages non ductiles avec des qualités de dépôt comparables à celles obtenues par projection plasma, ainsi que des dépôts métalliques renforcés par des particules céramiques non fondues grâce à la technologie des fils fourrés.

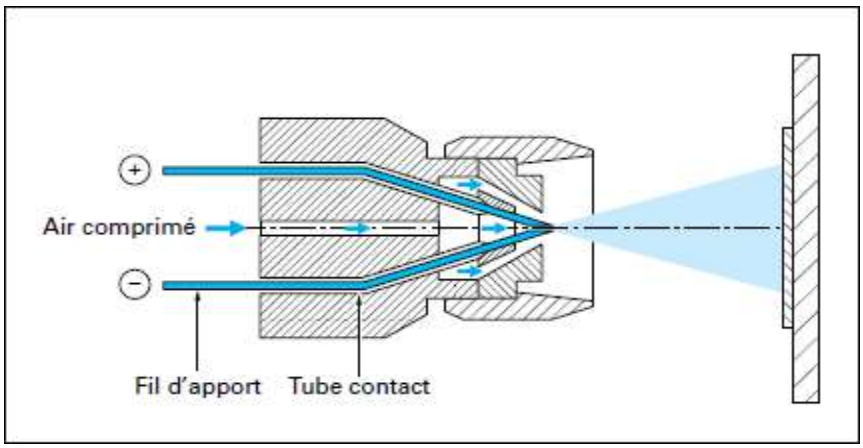


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un pistolet arc-fil **[2]**.

I.2.2.b. la projection par plasma d'arc

Un arc électrique est initié entre la cathode thermo-émissive et la tuyère en cuivre (anode). L'arc électrique est soufflé par les gaz plasmagènes qui sont injectés en amont de la torche entre les deux électrodes (figure I.8). Ces gaz sont ensuite chauffés (effet Joule) et partiellement ionisés, ils forment alors un écoulement de plasma en extinction en sortie de tuyère. Suivant les conditions expérimentales et le diamètre interne de la tuyère anode, la température du jet de plasma sur l'axe en sortie de tuyère varie entre 12000 à 14000K, et la vitesse d'éjection des gaz plasmagènes en sortie de tuyère sur l'axe est de 600 à 2200 m/s. Un injecteur externe ou interne permet d'introduire des particules solides dans le jet de plasma via un gaz porteur.

Ces particules, de taille comprise entre 10 et 100 µm, sont accélérées et fondues dans le jet de plasma avant d'impacter le substrat placé à 100-120 mm de la sortie de tuyère. Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des différentes particules écrasées (lamelles ou splats) et solidifiées sur le substrat. **[5]**.

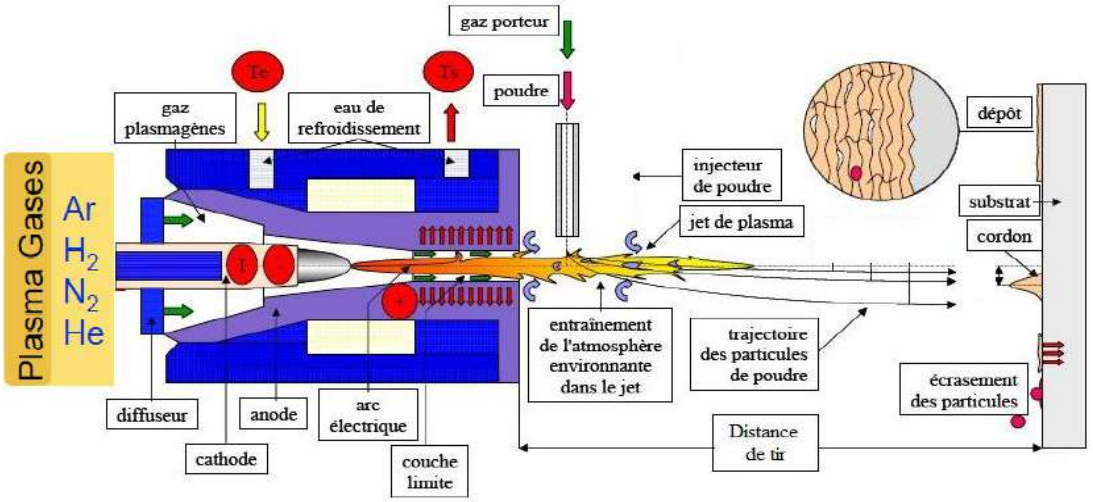


Figure I.8 : Schéma du principe de la projection par plasma d'arc. **[5]**

Le système est composé d'une torche à plasma d'arc soufflé, ce principe comporte trois éléments principaux :

_ Une torche à plasma (source de chaleur).

_ Un injecteur de particules céramiques (apport de matière première).

_ Un substrat où se forme le dépôt.

Donc, ce procédé peut être décomposé en plusieurs étapes : la génération de la source thermique, l'injection de particules, les transferts thermique et dynamique du plasma vers les particules, puis la formation du dépôt sur le substrat.

I.3. Comparaison des procédés

Le tableau I-1 ci-dessous résume et compare les principales caractéristiques des techniques de projection thermique.

Procédé / caractéristique	Flamme poudre	Flamme fil	Arc électrique	APS	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique	Plasma	Flamme	flamme
Température de la source (K)	3400	3400	10000-20000	8000-14000	24000-3100	3300
Vitesse des particules (m/s)	40	150	200	50-300	400-600	600-1200
Adhérence (MPa)	20-40	20-40	40	40-70	50-80	50-80

Tableau I.1: Caractéristiques moyennes des différents procédés de projection Thermique **[6]**.

Les données du tableau I-1 montrent que la technique de projection plasma présente un bon compromis : température de la source / vitesse des particules. Les vitesses acquises par les particules qui sont fondues en grande majorité (si les conditions opératoires sont adéquates) permettent un bon étalement des gouttes sur le substrat et une adhérence de dépôt supérieure à 40 MPa.

I.4. Principe de fonctionnement de la torche

Dans la plupart des cas, la torche à plasma constituée d'une tuyère anode et d'une pointe cathode, fonctionne dans l'air à la pression atmosphérique. Ce procédé est appelé APS (Atmospheric Plasma spraying)

La différence de potentiel aux bornes de la cathode et de l'anode provoque l'éclatement d'un arc entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode (Figure I.9). Cet arc est ensuite entretenu par le courant de forte intensité. La partie du gaz chauffée par effet Joule forme un volume de gaz ionisé ou plasma appelé colonne d'arc. Cette colonne d'arc quitte la torche en formant un dard ou cœur du jet **[7]**.

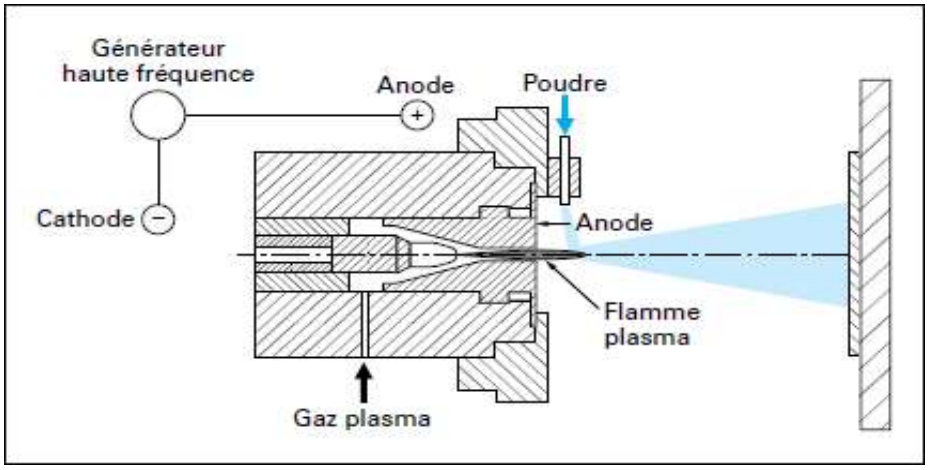


Figure I.9: Principe de fonctionnement d'une torche plasma **[2]**.

On distingue deux géométries de torche selon le type d'électrode :

- Les torches à écoulement laminaire (figure I.9-a), équipées d'une électrode pointue en tungstène, pour les gaz non oxydants (azote, argon) ou réducteurs (hydrogène). C'est cette configuration qui est utilisée dans ce travail de thèse.

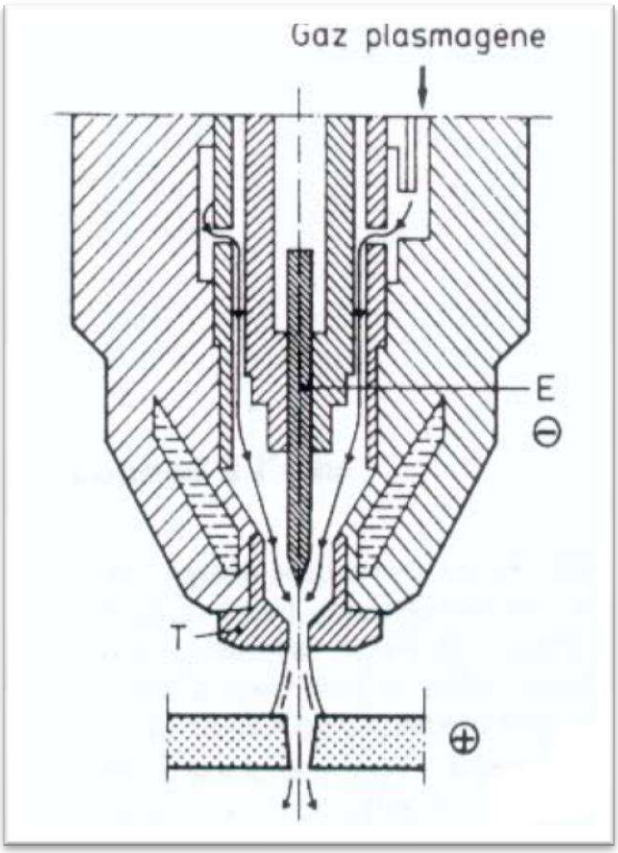


Figure I.9-a : torche à plasma à écoulement laminaire (E électrode, T tuyère) **[8]**.

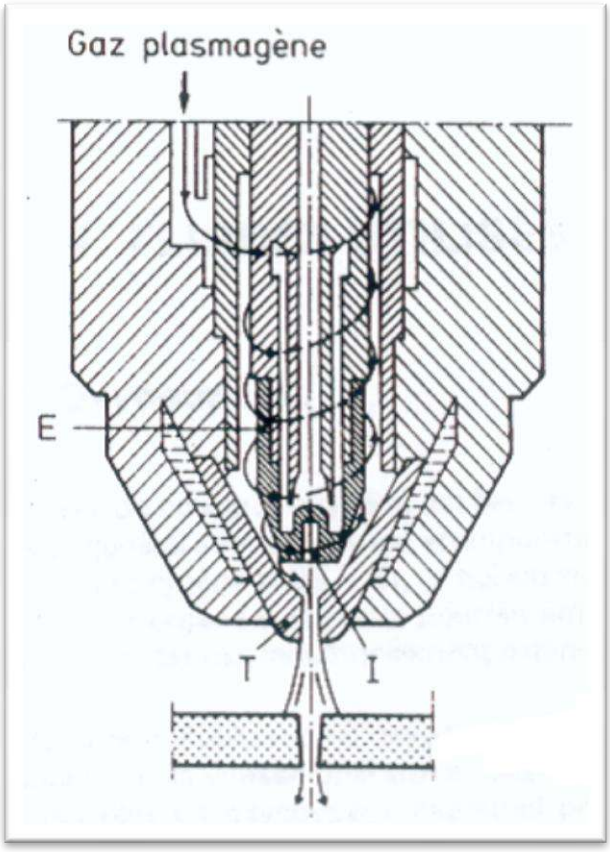


Figure I.9-b : torche à plasma à écoulement en vortex (I insert) **[8]**.

- Les torches à écoulement en vortex (figure I.9-b) utilisant une électrode à extrémité plate. Ces torches ont été historiquement conçues pour permettre l'utilisation d'inserts émissifs à oxyde réfractaire, tels l'hafnium ou le zirconium, lorsque le gaz plasmagène est oxydant. Pour cette géométrie, l'injection de gaz plasmagène est tourbillonnaire afin de stabiliser le pied cathodique de l'arc, ce qui limite l'oxydation et la destruction rapide de l'électrode. **[8]**.

I.5. L'arc électrique

❖ Génération :

Le développement de l'arc entre les électrodes peut être décrit en plusieurs zones, présentées sur la figure I.10. **[9]**

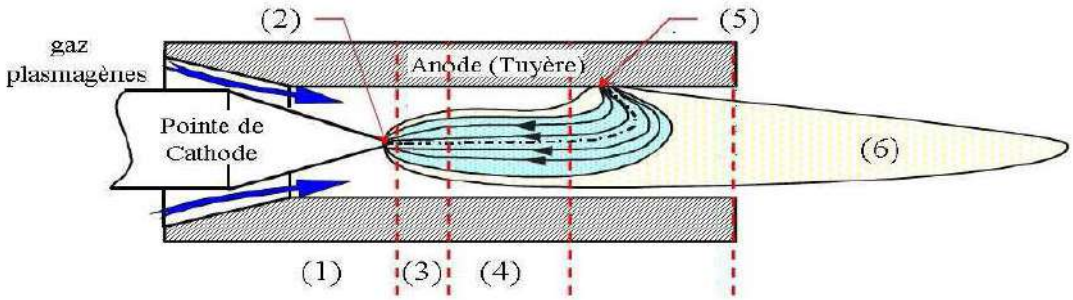


Figure I.10 : Représentation des différentes zones de développement de l'arc électrique selon *M.P. Planche*. **[10]**

Il est possible de distinguer 5 zones :

- **La zone (1) :** correspondant à l'injection des gaz plasmagènes. Leur type d'injection (axial, vortex ou radial) affecte l'écoulement plasma.

- **La zone (2) :** correspond à la « tache cathodique », zone d'émission des électrons. Les électrons sont émis de cette zone de quelques mm² et la densité de courant émise par la tache peut être calculée par la formule (I.1) de Richardson-Dushmann **[11, 12].**

$$\mathbf{j = A \cdot T^2 \cdot e^{e \cdot \Phi / K \cdot T}} \qquad \text{(I.1)}$$

Où :

$\boldsymbol{j}$: est la densité de courant ($\mathrm{A.m^{-2}}$)
$\boldsymbol{A}$: une constante dépendant du matériau ($\mathrm{A.m^{-2}.K^{-2}}$)
$\boldsymbol{T}$: la température (K)
$\boldsymbol{e}$: la charge d'un électron ($1{,}6.10^{-19}$ C)
$\boldsymbol{\Phi}$: le potentiel d'extraction du matériau (eV)
$\boldsymbol{k}$: la constante de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}\mathrm{J.K^{-1}}$)

- **La zone (3) :** correspond au développement de la colonne d'arc. Une partie du plasmagène est ionisée et subit un effet de pompage magnétohydrodynamique. C'est la naissance de l'écoulement plasma.
- **La zone (4) :** correspond à la colonne d'arc proprement dite. Des perturbations prennent naissance en périphérie de la colonne d'arc facilitant le mélange entre les gaz froids et cette dernière.

- **La zone (5)** : correspond à la tache anodique où sont collectés les électrons L'accrochage de l'arc se produit quand la couche limite froide entourant la colonne d'arc est suffisamment chaude et conductrice pour que le champ électrique permette le claquage de l'arc électrique. L'écoulement de gaz plus froid en périphérie provoque une constriction de la colonne d'arc et la tache anodique, généralement de faibles dimensions est soumise à un fort flux thermique (jusqu'à $10^{11}\ \mathrm{W.m^{-2}}$) qui peut entraîner une fusion locale de la tuyère. Cependant, le pied d'arc soumis à différentes forces se déplace, ce qui aide à assurer l'intégrité de la tuyère au moins pendant un certain temps. Ces forces sont : les forces de trainées dues à l'écoulement et les forces électromagnétiques de Laplace dues à l'interaction entre le courant d'arc et le champ magnétique induit, elles se combinent à des effets thermiques à la paroi (figure I.11).

Enfin, en sortie de la tuyère s'écoule le jet de plasma en extinction qui se mélange avec le gaz ambiant.

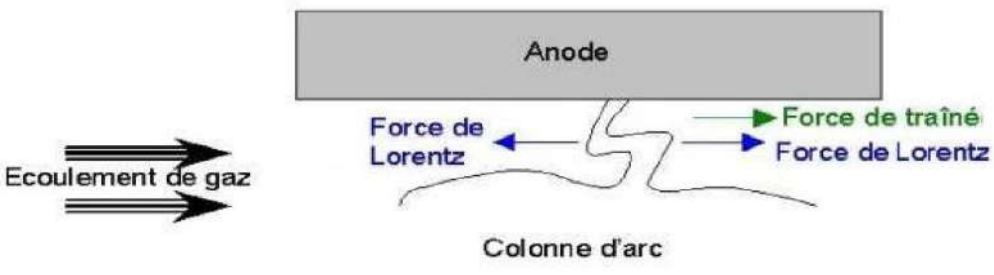


Figure I.11 : Schéma des forces qui s'exercent sur le pied d'arc et la colonne d'arc **[9]**.

Le démarrage de la torche est assuré par une décharge radiofréquence (quelques MHz) haute tension (5-10 kV) entre la pointe de la cathode conique et l'anode cylindrique. L'arc électrique se développe et s'entretient ensuite sous une faible tension (<100 V) et un fort courant (de 300 à 900 A).

I.5.1. L'´ecoulement du jet de plasma

En sortie de tuyère, le jet de plasma possède une température à cœur élevée (de l'ordre de 5000 a 15000 K) **[13, 14]**. La vitesse de l'écoulement atteint une valeur comprise entre 600 et 2200 $m.s^{-1}$ selon la composition du plasma .Le jet plasma entre en contact avec le gaz environnant froid et statique. La différence des vitesses entre l'écoulement du jet plasma et les gaz environnants génère une couche de cisaillement entre les deux formant des anneaux de vortex autour du jet **[15]**.

L'écoulement du jet passe d'un régime laminaire à un régime turbulent. La coalescence de ces anneaux en aval du jet, favorise la création de vortex plus grand dans lequel s'engouffrent et pénètrent les remous froids **[16]** .

Ces vortex, donc les remous froids, sont entraînés par le jet, le mécanisme évoluant de façon continue (figure I.12) **[17, 6]**. Le taux de gaz engouffré dans le jet dépend de la vitesse et de la viscosité du jet plasma. Ces deux derniers sont fonction de nombreux paramètres : nature des gaz plasmagènes, température du jet… etc.

Il a aussi été montré **[18, 6]** que l'entraînement des gaz environnants est favorisé par les fluctuations du pied d'arc, elles-mêmes dépendant de la vitesse et de la viscosité du jet plasma.

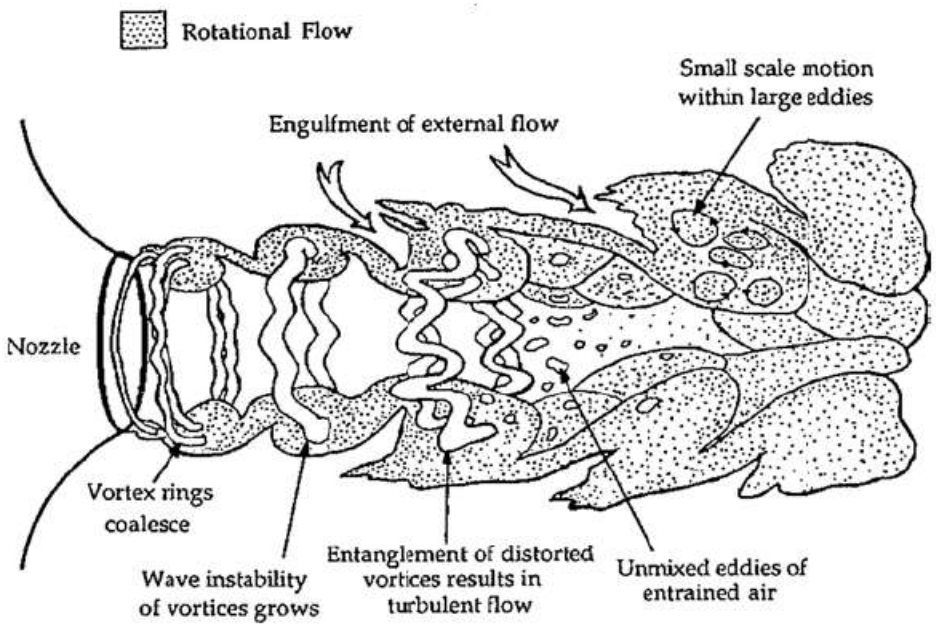


Figure I.12 : Description schématique du processus d'engouffrement **[19]**

La viscosité du jet plasma peut être décrite par la relation simplifiée suivante :

$$\boldsymbol{\mu = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} = \frac{\sqrt{mKT}}{\sigma_0}} \quad \text{(I.2)}$$

Où:

$\boldsymbol{\sigma_0}$**:** Section efficace (total scattering cross section) (m^2)
M : Masse molaire des gaz formant le plasma (kg)
T : Température des gaz plasmagènes (K)
K *:* Constante de Boltzmann (1,38.10-23 JK-1)

I.5.1. Les gaz plasmagène

Les principaux paramètres accessibles à l'opérateur sont le choix du mélange de gaz plasmagènes, le courant d'arc et le diamètre de tuyère.

Les propriétés d'un mélange de gaz plasmagènes sont intrinsèquement liées à la composition de ce dernier. Les gaz fréquemment utilisés en projection plasma présentent, de façon individuelle et en fonction de leur température, de grandes variations de leurs propriétés (figure I.13). Ces variations sont liées à la dissociation des molécules de gaz et à l'ionisation des atomes. En jouant sur la proportion entre les gaz, il est possible d'agir sur les propriétés du mélange plasmagène.

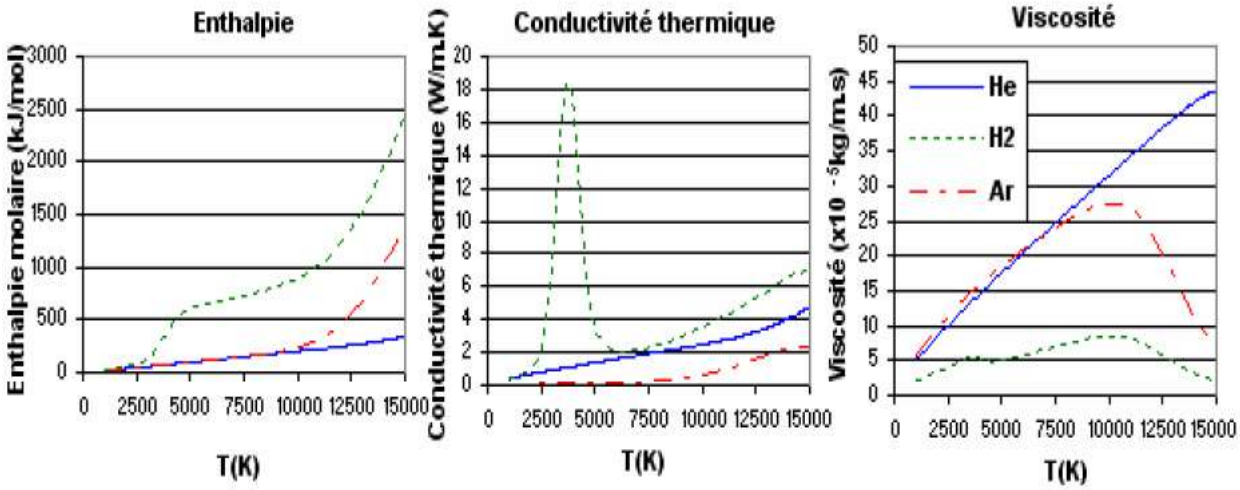


Figure I.13 : Propriétés des principaux gaz plasmagènes utilisés en projection plasma **[20]**.

Compte tenu de leurs propriétés thermodynamiques et de transports propres [21, 22, 23], chaque gaz plasmagène affecte le comportement de l'arc, celui de l'écoulement plasma, et le traitement du matériau injecté dans l'écoulement. L'influence des trois principaux gaz utilisés peut être présentée succinctement comme suit :

- L'argon permet d'augmenter la quantité de mouvement de l'écoulement du fait de sa masse molaire élevée.

- L'hydrogène permet d'augmenter l'enthalpie massique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique du plasma ; il entraîne également une diminution de la viscosité. Cette diminution favorise l'engouffrement d'air dans l'écoulement.
  D'autre part, du fait de sa forte conductivité thermique et de sa faible masse volumique, l'hydrogène déstabilise l'arc électrique par une diminution de l'épaisseur de la couche limite froide qui entoure la colonne d'arc. L'arc opère alors en mode « restrike ».
- L'hélium permet principalement d'augmenter la viscosité du jet et ainsi de retarder l'engouffrement d'air **[24]**. Il favorise un mode d'opération de l'arc de type « take-over».

L'augmentation de l'intensité du courant d'arc entraine une augmentation de la vitesse de l'écoulement, suivant la racine carrée de l'intensité **[25]**, mais ne modifie pas de façon significative sa température. Dans cette gamme de température, l'enthalpie fournie au gaz est, en effet, essentiellement convertie en énergie d'ionisation et peu en chaleur sensible. Une augmentation du diamètre de la tuyère entraine une diminution de la vitesse du jet. Le rapport des vitesses entre deux tuyères de diamètres différents est inversement proportionnel au carré du rapport des diamètres de tuyère **[25]**. Ces variations sont présentées dans la (figure I.14).

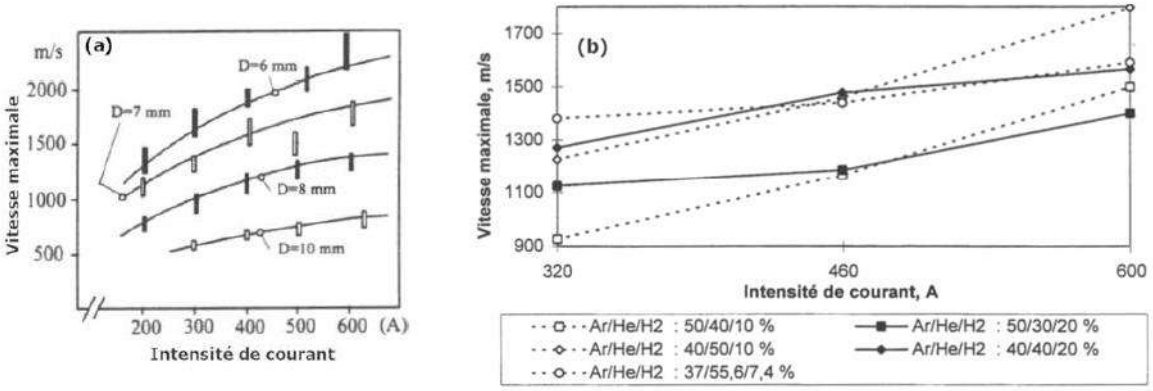


Figure I.14 : Influence de l'intensité sur la vitesse maximale du gaz à 4 mm en sortie de tuyère.
(a) Mélange binaire Ar/H2 (45/15 **Nl/min**) **[25]** D=Diamètre de tuyère
(b) Mélange ternaire Ar/He/H2 (débit total = 27 **Nl/min**), D= 6 mm **[21].**

I.5.2. Distance de tir

En projection à l'arc électrique, à la différence des procédés de projection à la torche, à l'arc plasma ou à la flamme, les particules subissent un refroidissement tout au long de leur trajectoire depuis les électrodes jusqu'au substrat. La distance de projection est donc un paramètre prépondérant pour s'assurer que les particules présentent encore un état de fusion satisfaisant au moment de l'impact. Une distance de projection trop courte peut entrainer un échauffement excessif du substrat. Par contre lorsque la distance est trop grande, les particules peuvent être trop froides voire partiellement resolidifiées lorsqu'elles impactent sur le substrat.

La caractérisation de dépôts (Tableau I-2) de NiCrAlY réalisés à 100 mm et 150mm de la sortie de buse montre une diminution du rendement de projection (de 58 a 55%), et de l'épaisseur déposée par passe lorsque la distance de tir est de 150 mm. Ceci peut s'expliquer par un refroidissement plus important des particules les plus fines qui ne participent plus, alors, à la formation du dépôt.

Les micrographies des coupes de dépôt montrent que les lamelles sont plus épaisses pour une distance de tir de 150 mm, ce qui peut indiquer qu'à cette distance, les particules ont une température plus faible, et donc une viscosité plus élevée a l'impact. Cependant, aucune variation significative de rugosité du dépôt n'est observée **[26].**

Distance de tir (mm)	Epaisseur du dépôt (mm)	Epaisseur par passe (µm)	Poids dépose (g)	Rendement de projection (%)	Rugosité Ra (µm)
100	160	40	4,8	58	12
150	140	35	4,3	55	11

Tableau I-2 : Propriétés de dépôts de NiCrAlY réalisés sous air à des distances de tir de 100mm et 150mm (250A, 38V) **[26]**

La teneur en oxyde des dépôts réalisés à une distance de 150 mm diminue de 45% lorsque le gaz d'atomisation est de l'argon, tandis que pour des dépôts réalisés à 100 mm, la diminution de la teneur en oxyde est de 63%. Ceci peut s'expliquer par le fait que la quantité d'air mélange au gaz d'atomisation augmente avec la distance de tir **[27].**

I.5.3. Vitesse de l'écoulement

Dans la plupart des cas réels, la vitesse de projection de la goutte sur la surface (liquide ou solide) est très élevée. C'est le cas par exemple de la pulvérisation par spray, ou même de l'écrasement des gouttes d'eau sur les ailes d'un avion avec une vitesse d'impact de l'ordre de 300m/s. l'intervalle de temps entre l'impact et la fin de l'étalement est donc très court. L'écoulement est lié à un champ de vitesse qui évolue de façon importante au cours du temps. Avant l'impact, on se place dans le cas où la vitesse d'impact est normale au substrat et répartie de manière homogène dans la goutte. Lors de l'impact, cette vitesse change subitement de direction. Son intensité agit donc directement sur la nature de l'écoulement de la goutte. Cela se traduit initialement en termes d'énergie cinétique d'impact :

$$\mathbf{E_{ci}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\mathbf{m_g V_i^2} \qquad \text{(I.3)}$$

Tout au long de l'écoulement, jusqu'à stabilisation du système, cette énergie évolue par conversion en d'autres types d'énergies jusqu'à dissipation totale de l'énergie cinétique afin d'atteindre l'état stable **[28].**

I.6. Transfert de chaleur plasma-particules

La densité de flux de chaleur $q\ (W/m^2)$, absorbée par un corps solide immergé dans un milieu plasma obéit à la loi de Newton :

$$q = h\infty(T\infty - Ts) \qquad \text{(I.4)}$$

Où :

h_∞ ($W/m^2 \cdot K$) est le coefficient de transfert plasma-particules.

T_∞ (K) la température du gaz plasmagène.

T_s (K) la température de surface de la particule.

Ainsi lorsqu'une particule est plongée dans un bain plasma, elle est progressivement chauffée à travers une couche limite (figure I.15) par un flux de chaleur provenant de la conduction thermique (recombinaison ion électron et atome, bombardement électronique, absorption de rayonnement UV, activité catalytique vis-à-vis des espèces chargées et d'éventuelles réactions chimiques de type oxydation), et des courants convectifs lorsqu'elle se déplace. Cependant de ce flux de chaleur, il faut aussi soustraire les pertes radiatives (émission propre de la particule) **[29]**.

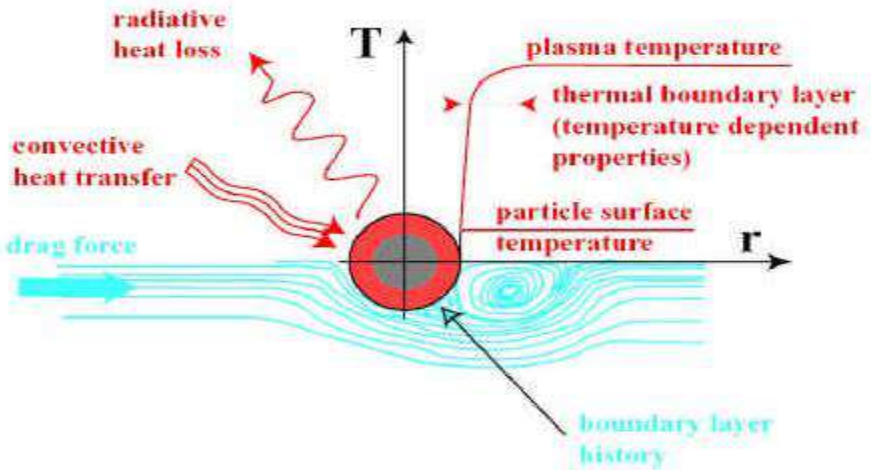


Figure I.15 : Schématisation du transfert de chaleur plasma- particule **[30]**

I.7. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat

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

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

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

La lamelle est la brique élémentaire constituant la couche. Sa morphologie et ses propriétés conditionnent la microstructure du dépôt et ses propriétés. L'analyse des phénomènes à l'impact permet de corréler les paramètres de projection à la microstructure du revêtement **[31]**.

I.7.1. Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat

Lors de son impact, la particule peut rebondir ou s'étaler avec ou sans éjection de matière. En effet, au contact avec le substrat, la particule se retrouve brusquement décélérée. L'augmentation de pression à l'interface entraîne la propagation d'une onde de pression à l'intérieur du matériau liquide qui peut provoquer son éjection partielle. *Mundo et al. (1995)* **[32]** ont déterminé un critère K, dit critère de Sommerfeld, reliant le comportement de la particule à l'impact aux nombres de Reynolds et de Weber. Ce critère est défini par l'équation (I.5) :

$$\boldsymbol{K = We^{0,5} \cdot Re^{0,5}} \qquad \text{(I.5)}$$

Où :
$\boldsymbol{We}$ est le nombre de Weber (équation I.6)
$\boldsymbol{Re}$ est le nombre de Reynolds (équation I.7).

$$\boldsymbol{We = \frac{\rho \cdot d \cdot V^2}{\sigma}} \qquad \text{(I.6)}$$

$$\boldsymbol{Re = \frac{\rho \cdot d \cdot V}{\mu}} \qquad \text{(I.7)}$$

Où :
$\boldsymbol{\rho}$ est la masse volumique de la particule (kg. m^{-3}).
$\boldsymbol{V}$ sa vitesse ($m.s^{-1}$).
$\boldsymbol{d}$ son diamètre (m).
$\boldsymbol{\sigma}$ la tension de surface liquide -vapeur du matériau (J . m^{-3}).
$\boldsymbol{\mu}$ sa viscosité (kg. m^{-1}. s^{-1}).

Si K est inférieur à 3 il y a rebond de la particule, si K est compris entre 3 et 57,7 il y a étalement sans éjection de matière et pour K supérieur à 57,7 il y a « splashing » (figure I.16).

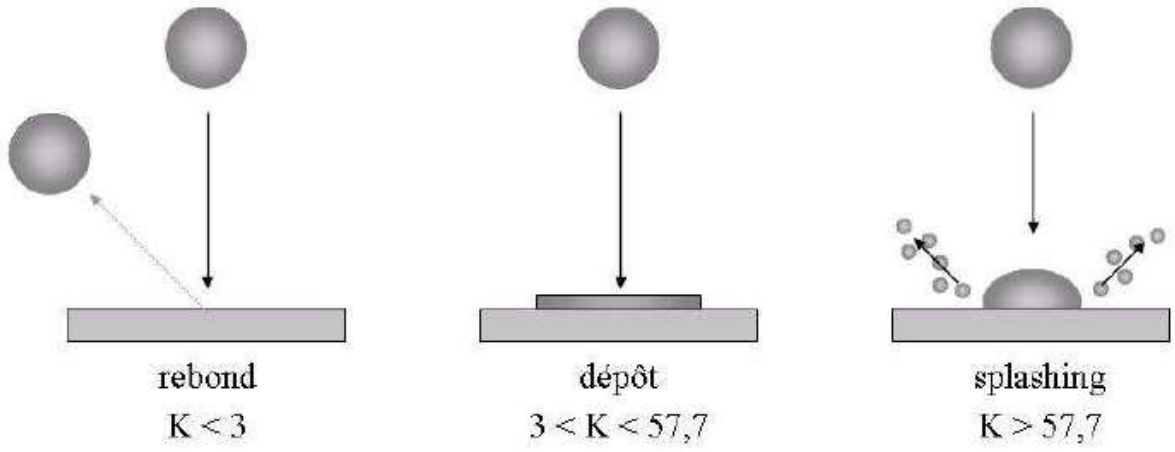


Figure I.16 : Modes d'impact **[33].**

Les éclaboussures présentes dans le troisième mode apparaissent quelques dizaines de nanosecondes après l'impact et sont dues à la propagation de l'onde de pression **[34]**.

I.7.2. Etalement de la particule

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule (figure I.17). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement **[35, 36].**

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* est supérieur à 70 et parfois quand $10<K<70$ **[37].** Cet éclaboussement croît en fonction de *K* et fait éjecter de petites gouttelettes perpendiculairement à la surface du substrat sur une distance voisine de 3mm, c'est-à-dire hors de la couche limite ce qui fait que la plupart sont entraînées par le gaz plasmagène.

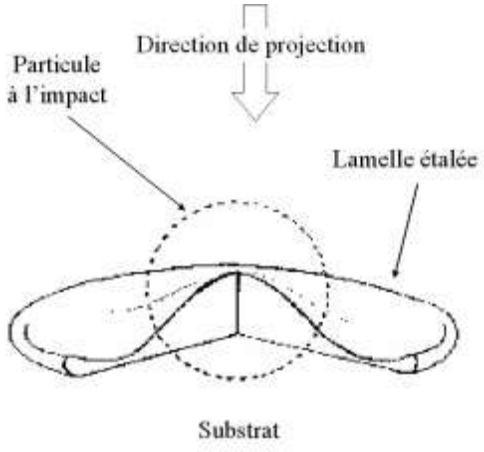


Figure I.17 : Schéma d'écrasement de la particule **[6]**.

L'étalement des particules (de l'ordre de la microseconde) est un phénomène complexe notamment quand la solidification de lamelles commence avant l'étalement complet. Les phénomènes intervenant dans cette étape sont gouvernés par plusieurs facteurs qui peuvent être classés en deux groupes : les propriétés des particules à l'impact (le diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l'état physico-chimique etc.…) et l'état de la surface du substrat où les particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques, l'oxydation etc.…) **[6].**

Plusieurs études expérimentales ont été effectuées (98% sur les surfaces lisses) pour comprendre l'influence des propriétés des particules à l'impact sur leur écrasement et la formation des splats **[38]**. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température **[39]**, de la rugosité **[40]** et des propriétés thermiques du substrat **[41]** sur l'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué **[42]**. Il faut noter que la mouillabilité dépend de la rugosité et de la porosité du substrat ainsi que de la composition chimique et de l'état cristallin des particules et du substrat.

Madjeski (1976) **[43]** a défini le degré d'étalement ξ comme le rapport entre le diamètre de la particule étalée D et le diamètre d de la particule avant l'impact (équation I.8) :

$$\xi = {}^{D}/_{d} \tag{I.8}$$

A partir de l'équation (I.8) et en négligeant les phénomènes de tension de surface, ce rapport peut être relié aux propriétés de la particule liquide à l'impact par l'intermédiaire du nombre de Reynolds suivant l'équation (I.9) :

$$\xi = 1{,}29 \cdot \mathbf{Re}^{0,2} \tag{I.9}$$

Des études numériques de la simulation d'impact de gouttes sur un substrat et des études expérimentales ont conduit également à une équation du même type (I.10) **[44].**

$$\xi = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Re}^{b} \tag{I.10}$$

Où :

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

I.7.3. Solidification des lamelles

Le refroidissement de la lamelle s'effectue essentiellement par conduction thermique à l'interface, il est donc conditionné par la qualité du contact entre la lamelle et le substrat (ou la couche de dépôt précédemment déposée). En effet, seule une fraction de la surface de la lamelle est en contact avec la couche inférieure (entre 20 et 30 %). L'interface est alors divisée en régions de bon contact thermique (contact direct lamelle-substrat) où le contact peut être considéré parfait et mauvais contact thermique (présence d'oxydes, d'inclusions gazeuses).

Ainsi, l'interface est caractérisée par un coefficient global d'échange thermique $\boldsymbol{h}$ quantifiant les échanges thermiques avec la lamelle et influant directement sur la vitesse du refroidissement (comprise entre 10^8à 10^9 $K.s^{-1}$ pour de la zircone yttriée sur substrat poli (BIANCHI et AL, 1997)).

Selon RUHL 1968, les facteurs les plus importants, conditionnant le refroidissement sont la qualité du contact thermique ainsi que l'épaisseur de la lamelle. Ces influences sont traduites par le nombre de Biot.

$$\mathbf{Bi} = \frac{\boldsymbol{h} \cdot \boldsymbol{e_p}}{\boldsymbol{K_s}} \tag{I.11}$$

Où :

$\boldsymbol{h}$: est le coefficient d'échange thermique à l'interface.

$\boldsymbol{e_p}$: l'épaisseur de la lamelle.

$\boldsymbol{K_s}$:la conductivité thermique du substrat ou de la couche déjà formée.

Le nombre de Biot permet, selon sa valeur, de classer le refroidissement de la lamelle en trois catégories :

- Bi >30 : le contact thermique est considéré parfait, la résistance thermique de contact est très faible (inférieure à 10^{-8}m².$K.W^{-1}$), le refroidissement est qualifié d'idéal.
- Bi <0,1, le transfert thermique à l'interface est limitant, la résistance thermique de contact est élevée (en général supérieure à 10^{-6}m².$K.W^{-1}$) et le refroidissement de la lamelle est isotherme.
- 0,01< Bi <30, le refroidissement est qualifié d'intermédiaire.

La vitesse de refroidissement est comprise entre 4.10^8et 5.10^9 **[45]**.

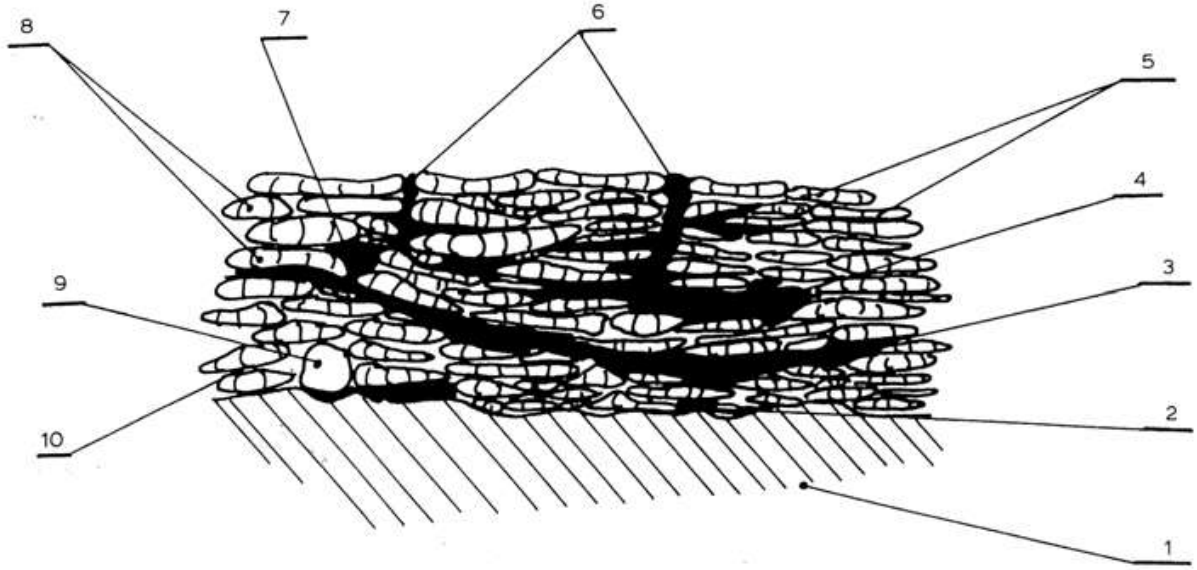
I.8. Caractéristiques microstructurales des revêtements

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

Ce mouvement inclut généralement un décalage de la torche, entre chaque passage de la pièce devant la torche il définit le « pas de projection» qui conditionne le recouvrement des cordons. Il est nécessaire de contrôler ce recouvrement afin de contrôler le flux thermique apporté à la couche sous- jacente. *Bernard et al. (1990)* ont préconisé pour la projection de matériaux céramiques un taux de recouvrement de 50% et une épaisseur par passe maximale de 10 μm **[46]**.

Le revêtement présente une structure lamellaire anisotrope et hétérogène résultant de la disparité de l'état thermocinétique des particules à l'impact, de leurs modes d'étalement et de solidification. Des contraintes au sein de la couche provoquent également l'apparition de fissures (figure I.18). Cette structure présente des pores qui jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques et thermiques de la couche. Ces pores peuvent être classifiés en trois catégories **[47**, **48**, **49]** :

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

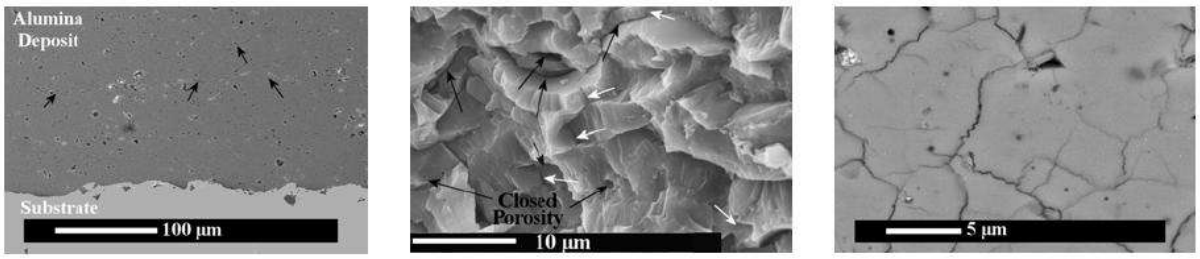


1 : substrat ; 2 : défauts d'adhérence ; 3 : décohésion du dépôt due aux passes de la torche ; 4 : décohésion du dépôt due à la relaxation des contraintes résiduelles ; 5 : fissures au sein de lamelles ; 6 : fissures verticales résultant des contraintes résiduelles et porosité ouvert ; 7 : porosité fermée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

Figure I.18 : Schéma de la microstructure d'un dépôt réalisé par projection plasma **[30]**.

I.8.1. Dépôts d'alumine

Les figures I.19 a et b présentent, respectivement, les micrographies en coupe polie et après fracture des dépôts d'alumine élaborés à 573 K.



(a) (b) (c)

Figure I.19 : Micrographies (MEB) en coupe polie (a) et fracturée (b), et en surface polie (c) du dépôt d'alumine élaboré à 573 K **[6]**.

Les défauts inter-lamellaires (flèches noires sur la figure I.19-a) et de la porosité peuvent être observés sur ces images. La figure I.19-b montre la structure lamellaire du dépôt d'alumine et la microstructure colonnaire des splats ainsi que les défauts intra-lamellaires (flèches blanches). Les micrographies de la surface polie du dépôt d'alumine (figure I.19-c) mettent en évidence la présence de porosité ainsi que des microfissures. Ces microfissures, liées aux contraintes de trempe, indiquent des contacts de bonne qualité entre les splats. Une structure similaire a été observée pour des dépôts d'alumine réalisés à 400 et 723K **[6]**.

I.9. Substrat

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 importante, car il est en effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas à son substrat **[50, 51]**

I.9.1. Préparation de substrat

Les techniques de préparations 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 **[52, 53]** :

- un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passavants 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 ≫ qui permet la création d'un état de surface rugueux. Apres le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Outre la création d'une grande surface d'adhérence, la rugosité permet également de diminuer les contraintes résiduelles générées au sein du dépôt en empêchant leur addition par la séparation des grains écrasés, notamment pour les contraintes parallèles au substrat qui tendent à provoquer le décollement des dépôts.

En contrepartie, cependant, le sablage crée des contraintes de compression dans le substrat au voisinage de la surface sablée. Le sablage se fait généralement à l'aide de particules d'abrasifs, le plus souvent de l'alumine, entrainées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat. Un nettoyage ultérieur (par ultrasons et solvant par exemple) est indispensable pour éliminer les particules de sablage incrustées dans les creux et toute trace de graisse (introduite par exemple par l'air de sablage).

I.9.2. Construction du dépôt

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire **[54, 55]** comportant éventuellement des oxydes, des microporosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites (figure I.20). La manière dont les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité. Par ailleurs, la formation des lamelles peut s'accompagner d'un phénomène d'éclaboussure à l'impact et /ou à la fin de la phase d'étalement.

Les mécanismes d'étalement et de solidification des particules sont relativement complexes, car ils dépendent de l'énergie cinétique et thermique **[56]**. Le phénomène d'éclaboussure peut être réduit en diminuant la taille des gouttelettes et/ou leur vitesse d'impact en jouant sur le débit du gaz d'atomisation ou sur la géométrie des buses, des gouttelettes, de leur viscosité et de leur mouillabilité vis à vis du matériau substrat, de la nature et de l'état de surface du substrat ainsi que de sa température.

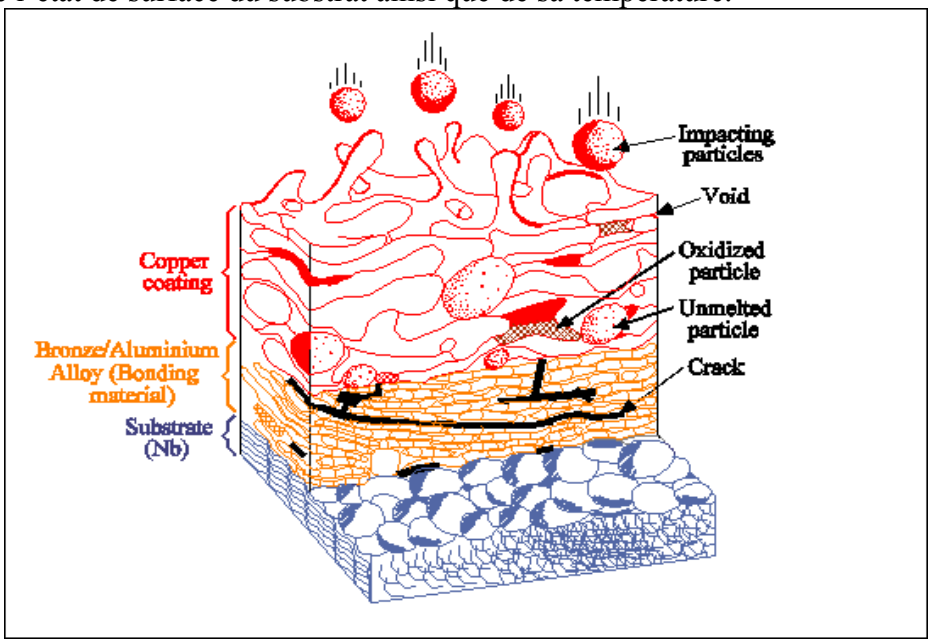


Figure I.20 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique **[85]**

Outre la porosité, une caractéristique des dépôts arc-fil est leur forte teneur en oxyde comparée à celle des dépôts réalisés par d'autres techniques de projection thermique.

I.9.3. Phénomènes d'oxydation

L'inclusion d'oxydes dans les dépôts tend généralement à dégrader leurs propriétés : ils présentent des lamelles moins fortement liées, une composition chimique hétérogène et des contraintes internes résultant de la différence de coefficient de dilatation thermique entre oxydes et métaux.

Les phénomènes d'oxydation peuvent intervenir à différents stades du procédé :

- oxydation des gouttelettes métalliques chauffées en vol.
- oxydation pendant la phase de formation des lamelles sur le substrat.
- oxydation de la surface du dépôt lors de son refroidissement.

Ce dernier mécanisme est généralement négligeable compte tenu de la température atteinte par le substrat (100-200°C).

I.9.3.a. Oxydation des gouttelettes en vol

L'importance de l'oxydation des gouttelettes en vol dépend **[57, 58]** :

- de la nature du matériau projeté,
- de la température des gouttelettes,
- du temps de séjour des particules en vol, donc de leur vitesse et de la distance de tir,
- de la quantité d'oxygène présente au voisinage des gouttelettes,
- de la cinétique des réactions d'oxydation,

- des mécanismes de diffusion de l'oxygène vers le cœur des particules.

La quantité d'oxygène présente dans le jet provient du gaz d'atomisation s'il s'agit d'un gaz oxydant comme l'air, mais aussi de l'entrainement de l'air ambiant à la sortie de la tuyère.
L'oxydation des particules en vol peut être due à deux mécanismes :

1. La diffusion de l'oxygène dans les gouttelettes fondues.
2. Les mouvements de convection induits au sein de la gouttelette liquide par l'écoulement du gaz d'atomisation (figure I.21).

Ces mouvements entrainent de l'oxygène et des oxydes vers le centre de la gouttelette, et amènent du métal ≪ frais ≫ en surface qui peut alors s'oxyder. De tels mouvements se produisent pour des différences de viscosité cinématique entre le gaz et la particule importantes (V_{gaz} /$V_{\text{particule}}$ >50) et pour un nombre de Reynolds de la particule supérieur à 20. Ce phénomène est donc favorisé par des vitesses de gaz d'atomisation élevées **[59, 60, 61]**.

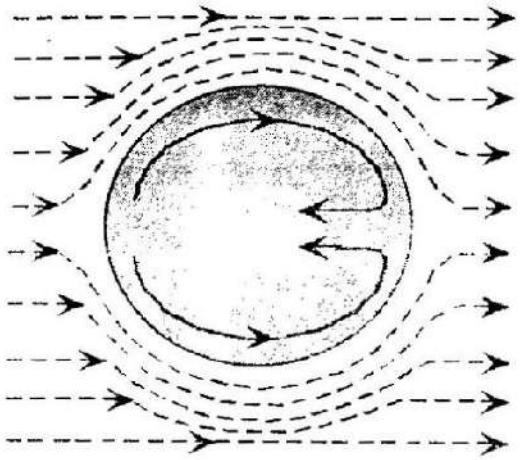


Figure I.21 : Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette **[58].**

L'oxydation en vol peut être donc relativement importante et ne doit pas être sous-estimée.

I.9.3.b. Oxydation lors de la formation du dépôt

Il est possible de distinguer 2 types d'oxydation **[62]** :

1. L'oxydation des lamelles : elle est généralement peu importante car les lamelles ne sont soumises à l'air ambiant que pendant quelques microsecondes, avant qu'elles ne soient recouvertes par d'autres lamelles.
2. L'oxydation entre deux passes successives : elle peut être non négligeable puisqu'il peut s'écouler quelques secondes à quelques heures entre deux passes successives suivant la taille de la pièce et la vitesse pistolet-substrat. L'étape militante est la diffusion de l'oxygène à travers la couche d'oxyde en surface. Elle dépend en grande partie de la température du couple dépôt /substrat pendant et après le tir. Cependant, ce type d'oxydation est limité en projection arc-fil car la température du substrat dépasse rarement les 200 °C.

I.10. Caractéristiques du dépôt

I.10.1. Microstructure

Les particules fondues s'écrasent sur le substrat où des particules sont déjà déposées et forment de fines lamelles qui s'adaptent aux irrégularités de la surface. Le temps de solidification d'une particule projetée est de l'ordre de la microseconde à la dizaine de microsecondes **[63, 64]**.

Les caractéristiques de la microstructure dépendent, d'une part, des paramètres des particules a l'impact (vitesse, taille, état de fusion et état chimique) et d'autre part, des paramètres du substrat (matière, rugosité, état chimique de la surface et température) **[65, 66]**.

I.10.2. Teneur en oxydes et porosité

Fondamentalement, trois paramètres principaux, la vitesse, la température et la taille de particules, influencent la porosité et la teneur en oxydes des dépôts. La fraction d'oxydes dans le dépôt est inversement proportionnelle au diamètre et à la vitesse de particules et directement proportionnelle à la température de surface des particules **[67, 68].** L'augmentation de la température des particules se traduit par une diminution de leur viscosité et la rugosité du dépôt est réduite.

On peut distinguer trois types de porosités : la première est la porosité fermée avec des pores entièrement inclus dans le dépôt, la seconde est la porosité ouverte avec des pores qui présentent une extrémité fermée et une autre ouverte au niveau de la surface du dépôt ou de la surface de coupe et la troisième concerne les pores ou plutôt des fissures qui traversent le dépôt, de sa surface jusqu'au substrat **[69]**.

I.10.3. Adhérence et dureté

Plusieurs mécanismes interviennent sur l'adhérence du dépôt au substrat tels que la diffusion, les réactions chimiques, des forces électrostatiques, l'accrochage mécanique, etc. **[70, 71]**. Cependant, dans le cas des dépôts élaborés par projection a l'arc, l'adhérence est générée essentiellement par trois types de liaisons **[72,73]** :

1- l'accrochage mécanique,
2- les liaisons chimiques,
3- les liaisons métalliques.

En considérant la solidification rapide des particules et la microstructure lamellaire des dépôts, l'accrochage mécanique est le mécanisme principal d'adhérence. Le comportement mécanique du dépôt et en particulier son adhésion/cohésion dépendent de la morphologie des lamelles, des aires de contact réel entre les lamelles ainsi que de la rugosité du substrat **[74, 75]**.

La préparation du substrat avant projection détermine donc en grande partie l'adhérence finale du dépôt. Ainsi, un sablage adapte (particules projetées, contrôle des contraintes de compression générées au voisinage de la surface et conditions de préchauffage éventuel du substrat) favorisera l'accrochage mécanique des particules. De plus, les opérations de nettoyage et de dégraissage du substrat ainsi que l'élimination des résidus de sablage favorisent un bon contact entre les lamelles étalées et le substrat **[53, 76]**.

La micro dureté est une propriété significative parce qu'elle donne une indication de la résistance à l'usure abrasive. Elle est affectée par la teneur en oxydes et la porosité du dépôt. La dureté des dépôts dépend donc de la nature du gaz de projection. Pour des dépôts d'acier, il a été observé que, avec de l'air comme gaz d'atomisation, une teneur en oxydes plus élevée conduit à une dureté plus élevée, mais en utilisant de l'azote, une meilleure conservation du carbone permet aussi une augmentation de la dureté avec une teneur en oxyde limitée. L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt **[72, 67]**.

I.10.4. Resistance à la corrosion

La corrosion, et en particulier l'oxydation, reste l'un des plus grands problèmes techniques auquel on doit faire face. Chaque année dans les pays développés, la corrosion détruit l'équivalent de 3 a 5 % du produit intérieur brut. Les dépôts réalisés par projection thermique peuvent en particulier prémunir de la corrosion des structures en acier et en fer **[77]**.

La résistance à la corrosion des dépôts dépend de leur microstructure et de la résistance à la corrosion des matériaux qui les constituent. Il faut en effet prendre en compte la corrosion du substrat à travers des pores traversant ou d'autres défauts dans le dépôt et les surfaces au contact. Il peut également se produire une corrosion galvanique du dépôt ou du substrat. Celle-ci peut aussi se produire entre deux phases ou constituants du dépôt lui-même. Le colmatage d'un dépôt poreux peut diminuer significativement le risque de corrosion générale et galvanique du dépôt **[78, 79]**.

Les dépôts réalisés par projection thermique ont fondamentalement trois inconvénients quand ils sont utilisés pour lutter la corrosion.

- Le premier point faible est la teneur en oxydes qui est générée pendant la projection. Il convient de noter que la présence d'oxydes dans le dépôt diminue sa passivité **[80, 81]**.
- Le deuxième inconvénient réside dans la présence de pores ouverts et de fissures entre les lamelles, par lesquelles les environnements corrosifs pénètrent jusqu'au substrat. Les espaces entre les lamelles sont à l' origine également de la corrosion caverneuse.
- Le troisième est la dégradation des matériaux constitutifs des dépôts

pendant la projection. Certains éléments tels que le chrome et l'aluminium sont partiellement oxydes. En raison de ce phénomène, la composition chimique du dépôt est différente de celle du matériau projeté **[82, 83]**.

I.10.5. Usure

Il existe trois principaux types d'usure : adhésif, érosif et abrasif. Des dépôts de natures différentes peuvent être employés efficacement pour combattre ces mécanismes d'usure, y compris lorsque celle-ci est accompagnée de phénomènes de corrosion à température ambiante ou élevée.

L'usure adhésive est provoquée par le transfert de matière d'une surface à l'autre de deux pièces en contact et en mouvement relatif. La composition, la microstructure et la topographie de la surface, la présence ou l'absence de lubrifiants ou d'autres medias, la charge et la vitesse de contact, et la température affectent ce type d'usure.

L'usure érosive est provoquée par l'impact sur la surface d'un fluide, contenant une suspension des particules dures. Le taux d'érosion est fonction de l'angle d'impact, de la composition et de la microstructure de la surface et des particules participant à cet impact, de la vitesse, de la taille, de la forme et de la masse de ces particules, et des températures du fluide et de la surface **[84, 78]**.

L'usure abrasive correspond à une perte progressive de matière à la surface de travail d'un corps et résultant d'un mouvement relatif au niveau de cette surface (figure I.22).

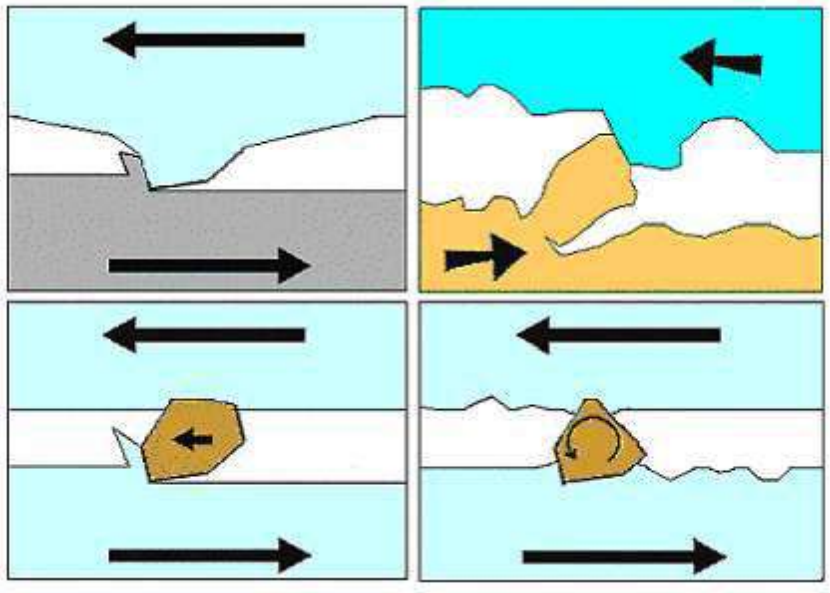


Figure I.22 : Schéma de principe de l'usure abrasive **[85]**

Chapitre II :

Modélisation mathématique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre et à la suite d'une présentation brève du système d'équations générales régissant l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible en régime laminaire. Nous ne considérons ici que les aspects relatifs aux caractéristiques dynamiques de l'écoulement laminaire avec transfert de chaleur.

II.2. Modèle dynamique

Bien que les expériences concernant les impacts de gouttes aient pris de l'ampleur depuis les premiers travaux de Worthington. La diversité des écoulements, les temps caractéristiques très courts et les échelles spatiales très petites rendent les manipulations difficiles à réaliser. De plus, le caractère aléatoire de l'impact est difficile à contrôler (vitesse d'impact; température…).

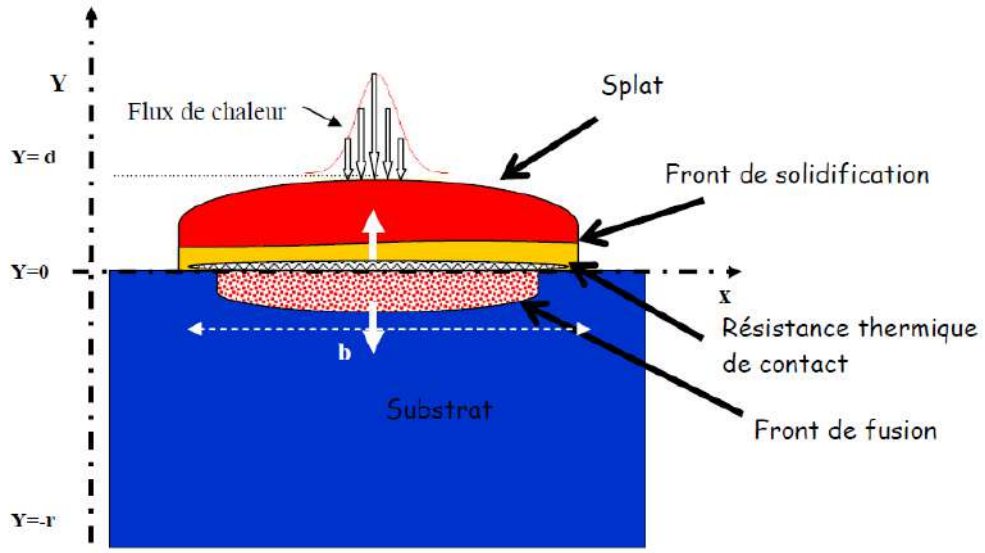


Figure II.1 : Schéma de principe des échanges thermiques entre la goutte, en cours de gel, et le substrat selon **[86].**

La mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie.

II.2.1. Modélisation de l'écoulement des fluides

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

II.2.1.1. L'équation de la continuité

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

L'équation de continuité globale est donnée par :

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

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

Donc l'équation devient :

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

II.2.1.2. L'équation de quantité de mouvement

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

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

Où :

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

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

P : la pression.

$\vec{\boldsymbol{g}}$: la gravité.

II.2.1.3. Équation de l'énergie

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

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

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) **[87]**. 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 **[88]**. 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 **[89]** :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

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

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

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

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

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

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

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

La formulation par élément finie d'un tel problème fait alors appel à des technique de maillage évolutif, le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes (ou surface) se superpose à ce front. Parmi ces méthodes on citera celles qui utilisent des transformations de coordonnées pour résoudre le problème dans un espace de coordonnées à maillage régulier **[87]**.

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

II.3.1.2. Méthode à grille fixe

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

II.3.1.2.a. Méthode d'enthalpie

La méthode d'enthalpie à maillage fixe est devenue un standard des modélisations des changements de phases liquide-solide. Elle a été décrite en détails, entre autres, par Voller et al **[90]**. Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'à aujourd'hui **[91]**.

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.2) elle inclut la chaleur latente par unité de masse L_f et est définie comme suit :

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

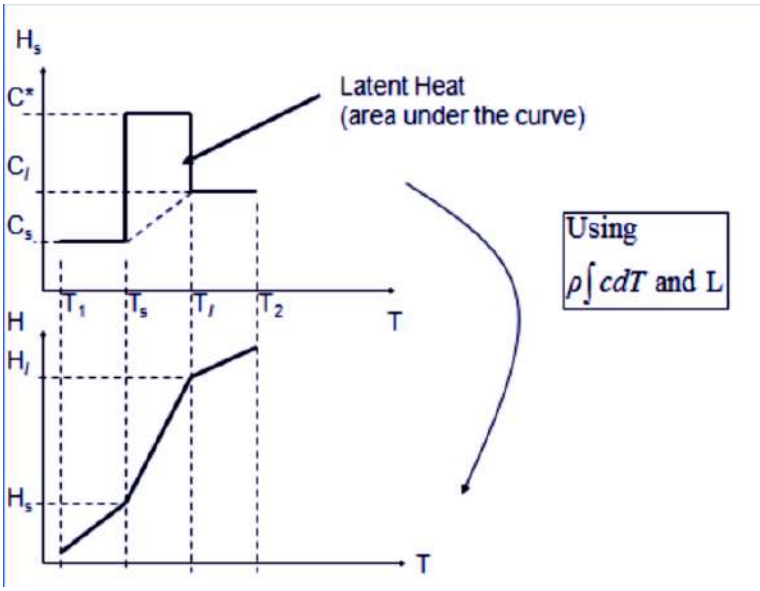


Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température **[92]**

La conservation de l'énergie s'exprime alors **[92]**.

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

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

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

Et en fonction de la température

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

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

La formulation en capacité calorifique équivalente consiste à prendre en compte la chaleur latente directement dans la capacité calorifique c_p **[92]**. Ainsi, si le chemin de solidification n'est fonction que de la température, on peut formellement définir une chaleur spécifique équivalente :

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

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

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

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

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

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

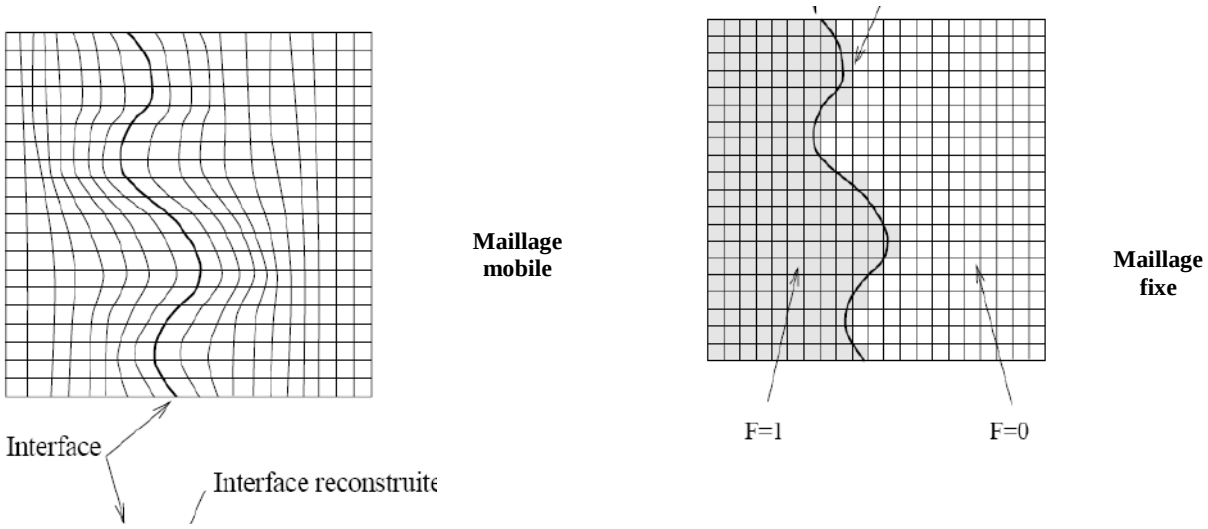
II.3.2. Modèle thermique utilisé

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

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

II.4.Calcul d'interfaces

Les techniques de calcul d'interfaces peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles (figure II.3) en fonction de maillage que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).



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

Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface
a) méthode Lagrangienne**, b)** méthode Eulérienne**, [93].**

- 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 **[94]** ; 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

c) Méthode de ligne de niveau (level set)

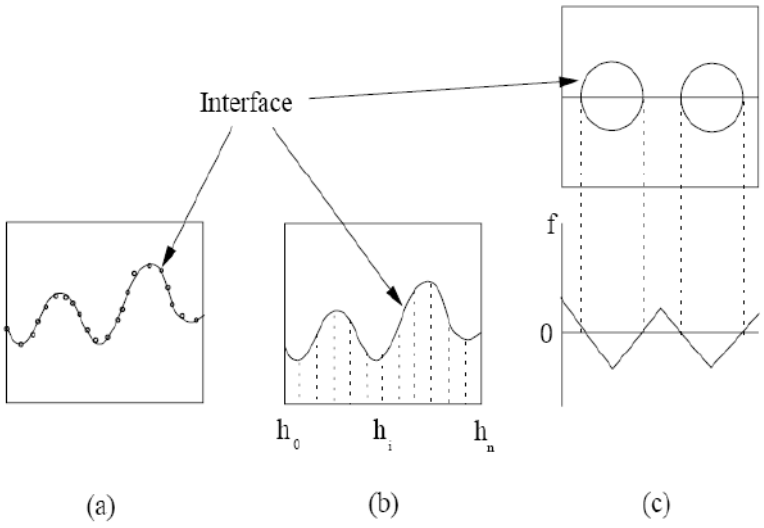


Figure II.4 : Différentes méthodes de suivi de front

a)marqueur de surface**, b)** fonction de hauteur**, c)** méthode de ligne de niveau**, [95].**

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.

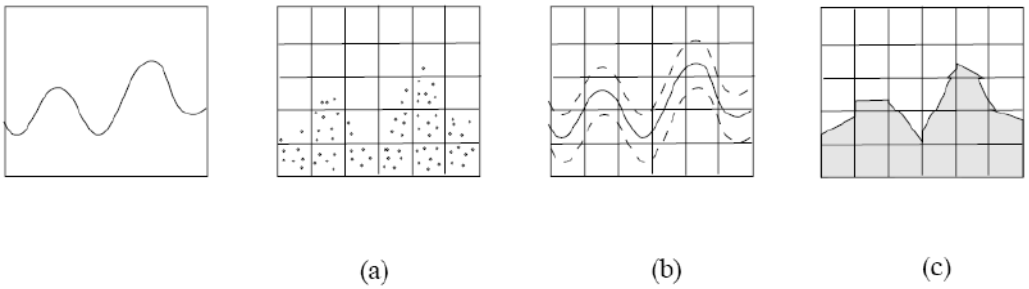


Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque **[96,97].**

- **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 un et une maille vide à une valeur de zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide (figure II.6).

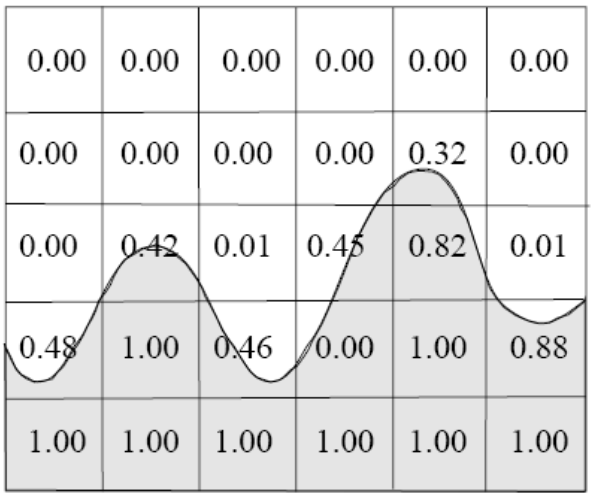


Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret **[98].**

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.7). 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.

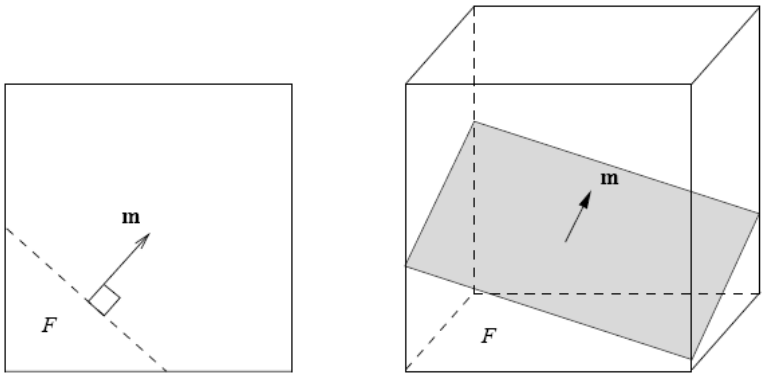


Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique **[99].**

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

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

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

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

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc.

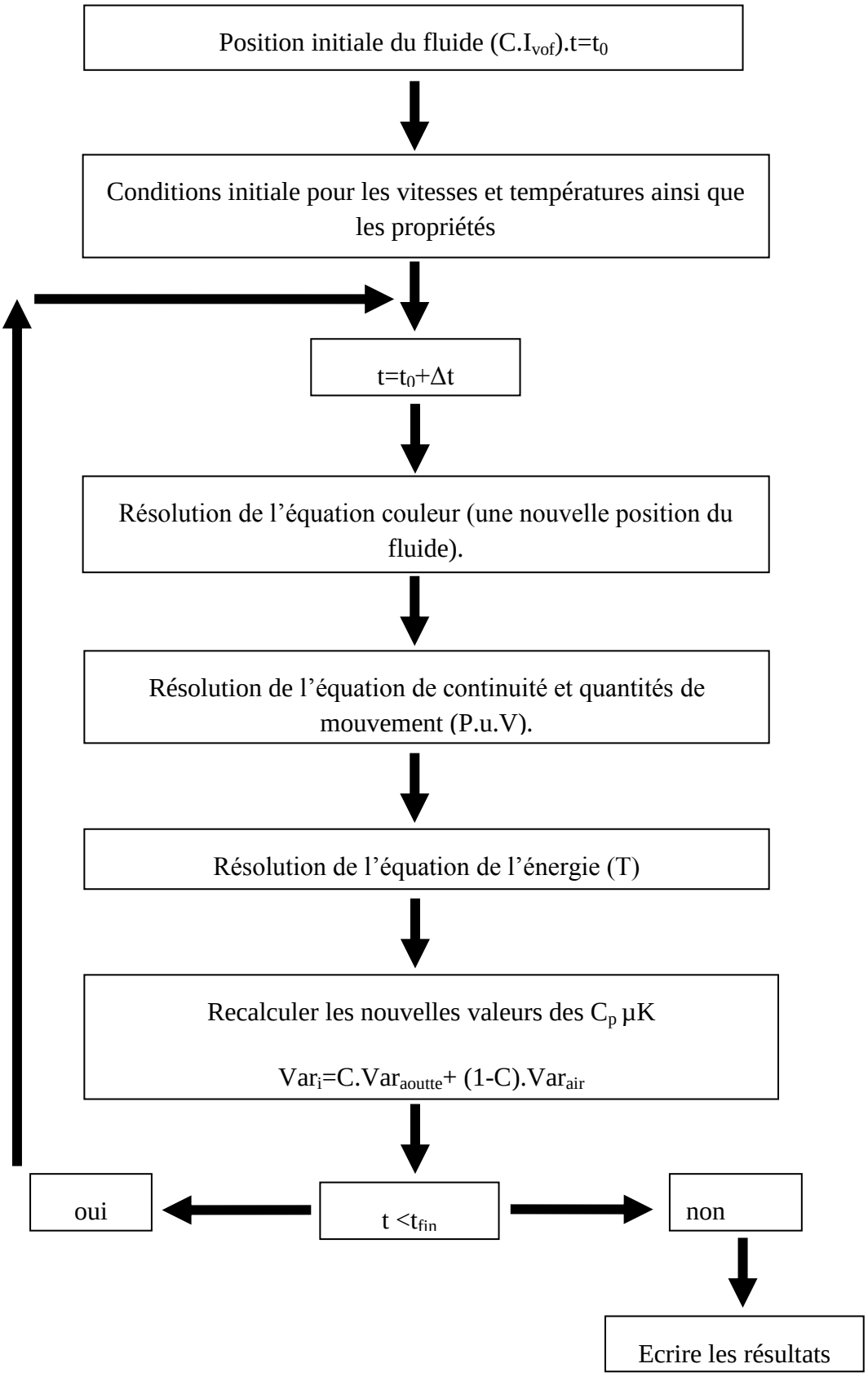


Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps **[86].**

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, sont présentées tous d'abord, les formulations mathématiques du modèle dynamique et thermique utilisées dans cette étude**.** Ainsi une présentation de la méthode de volume de fluide (VOF CIAM) utilisée pour simuler le transport de l'interface. La méthode est d'écrite en 2D. C'est une approche très concrète du problème totalement déférente des approches classiques qui consistent à utiliser des schémas de discrétisation. La diversité des écoulements, les temps caractéristiques très courts et les échelles spatiales très petites rendent les manipulations difficiles à réaliser. De plus, le caractère aléatoire de l'impact est difficile à contrôler (vitesse d'impact, température…). C'est pourquoi l'outil numérique devient rapidement indispensable afin de considérer les échelles de temps et d'espace fortement concernés.

Chapitre III :

Modélisation numérique

III.1. Introduction

Depuis de nombreuses années, les techniques de simulation connaissent un développement considérable. Les mises au point expérimentales, longues et coûteuses sont progressivement remplacées par des études dans lesquelles les outils de simulation prennent une place de plus en plus importante. Les impératifs industriels de rapidité et de limitation des coûts sont pour l'essentiel responsables de cette évolution. Les approches actuelles concernent l'ensemble des domaines et en particulier la prise en compte des phénomènes dynamique et thermiques.

III.2. Résolution numérique

Lors de l'impact d'une goutte sur un substrat sec, du point de vue de la dynamique (problème isotherme), la compétition entre les différents mécanismes agissant sur la phase d'étalement conduit à des régimes d'étalement très différents, étalement simple, étalement et rebonds ou éclatement (splashing). Quand il s'agit d'introduire le transfert de chaleur avec le substrat et plus particulièrement le processus de solidification, le problème devient d'autant plus complexe que les temps caractéristiques ne sont pas assez différents pour pouvoir découpler les deux processus et le nombre de paramètres augmente significativement. De plus les modèles de solidifications utilisés jusqu'alors sont des modèles à l'équilibre **[100]** ne permettant pas de prendre en compte des conditions de solidifications rapide.

Le modèle numérique proposé et qui sera implémenté dans un code numérique, consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes couplées avec les conditions d'incompressibilité ainsi que la conservation d'énergie thermique, discrétisées au moyen d'une méthode d'élément finis, et un algorithme de volume de fluide (VOF) est utilisé pour suivre la surface libre du fluide ,en un domaine à maillage fixe.

III.3. Discrétisation des équations

Il existe trois grandes familles des méthodes :

- La méthode des différences finies consiste en une discrétisation des opérateurs différentiels sur une grille de pas d'espace fixe à l'aide de développements de Taylor tronqués. Soit par exemple l'équation aux dérivées partielles

$$\boldsymbol{\partial_t u + \alpha \partial_x u = 0}, \quad \boldsymbol{\alpha} > 0 \qquad \text{(III.1)}$$

Un schéma aux différences finies possibles est

$$\frac{u_j^{n+1}-u_j^n}{\Delta t} + \alpha \frac{u_j^n-u_{j-1}^n}{\Delta x} = 0 \qquad \text{(III.2)}$$

- La méthode des volumes finis est la méthode de choix pour les équations de conservation non linéaires. Voilà quelques propriétés. Soit par exemple le système de lois de conservation en dimension deux d'espace

$$\partial_t U + \partial_x f(U) + \partial_y g(u) = 0 \qquad \text{(III.3)}$$

- La méthode des Éléments finis s'appuie sur une formulation variationnelle de l'équation aux dérivées partielles. Il n'existe pas de formulation variationnelle pour toute équation aux dérivées partielles. Les méthodes d'Eléments finis ne sont pas bien adaptées à la résolution numérique d'équations non linéaires.

III.4. Résolution des équations par éléments finis

III.4.1. 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 **[101]**:

$$\emptyset_h^k(x,y) = \sum_{i=1}^{Nk} \emptyset_i N_i(x,y) \qquad \text{(III.4)}$$

Où :

$\emptyset_i$ désigne la valeur de la fonction approchée $\emptyset_h$ au point x_i de coordonnées (x_i, y_i),
N_i la fonction d'interpolation associée à x_i,
N_k le nombre de fonctions utilisées pour l'élément K.
Les coefficients $\emptyset_i$ de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret. Les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie N_h dans lequel on cherche à priori la solution discrète $\emptyset_h$.

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

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

III.4.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.4.2.1. Formulation variationnelle 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 **[102,103]** :

$$\boldsymbol{\mathcal{L}(u) - \mathcal{F} = 0 \ \forall x \in \Omega \ B(u) = u_0 \ \forall x \in \Gamma_{u0}} \qquad \text{(III.5)}$$

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

III.4.2.2. 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 **[101,104]** :

$$\boldsymbol{\tilde{u} = \sum_{i=1}^{n} N_i \tilde{u}_i} \qquad \text{(III.6)}$$

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

2. introduire (III.6) dans (III.5) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon = \mathcal{L}(\tilde{u}) - \mathcal{F} \neq 0} \qquad \text{(III.7)}$$

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

$$\boldsymbol{\int_{\Omega} W_k (\mathcal{L}(\tilde{u}) - \mathcal{F}) d\Omega = 0, k = 1, 2, .. N} \qquad \text{(III.8)}$$

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

$$\mathbf{W_k = N_k \Longrightarrow \int_\Omega N_k . \mathcal{L}(\sum_{i=1}^{n} N_i \tilde{u}_i) d\Omega = 0} \quad \text{(III.9)}$$

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

$$\mathbf{\forall v \in H_0^1(\Omega): a(\tilde{u}, v) = \int_\Omega f\ v\ d\Omega} \quad \text{(III.10)}$$

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

$$\mathbf{Lu = 0\ sur \Omega\ et\ u = 0\ sur\ \partial\Omega} \quad \text{(III.11)}$$

III.4.3. Forme généralisée des équations du système et discrétisation

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

$$\mathbf{\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\emptyset \emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_\emptyset \emptyset) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_\emptyset \emptyset) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right) + S_\emptyset} \quad \text{(III.12)}$$

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 système.

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

Tableau III.1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[105].**

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 **[102]**.

$$\left([\mathbf{A_e^{transient}}] + \left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] + \left[\mathbf{A_e^{diffusion}}\right]\right)\{\emptyset_\mathbf{e}\} = \left\{\mathbf{S_e^{\emptyset}}\right\} \qquad \textbf{(III.13)}$$

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

III.4.3.1. Terme temporelle

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[102]** :

$$[\mathbf{A_e^{transient}}] = \int \mathbf{W^e} \frac{(\partial \rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset)^\mathbf{e}}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.14)}$$

Avec :

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

Pour le nœud i:

$$\int \mathbf{W_i^e} \frac{(\partial \rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset)^\mathbf{e}}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{d(vol)} = \int \mathbf{W_i^e} \rho \mathbf{c}_\emptyset \mathbf{W_j^e}\, \mathbf{d(vol)} \frac{\partial \emptyset_\mathbf{j}^\mathbf{e}}{\partial \mathbf{t}} + \int \mathbf{W_i^e} \frac{\partial \rho \mathbf{c}_\emptyset \emptyset_\mathbf{j}^\mathbf{e}}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{W_j^e}\, \mathbf{d(vol)} \emptyset_\mathbf{j}^\mathbf{e} \text{ (III.15)}$$

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

$$\mathbf{M_{ij}} = \int \mathbf{W_i^e} \rho \mathbf{c}_\emptyset \mathbf{W_j^e}\, \mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.16)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée.

$$\mathbf{M_{ij}} = \boldsymbol{\delta_{ij}} \int \mathbf{W_i^e} \rho \mathbf{c}_\emptyset\, \mathbf{d(vol)} \qquad \text{(III.17)}$$

Où :

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

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

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

$$(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n}} = (\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-1}} + \boldsymbol{\Delta t}\left(\boldsymbol{\delta}\left(\frac{\boldsymbol{\partial(\rho\emptyset)}}{\boldsymbol{\partial t}}\right)_{\mathbf{n}} + (\mathbf{1}-\boldsymbol{\delta})\left(\frac{\boldsymbol{\partial(\rho\emptyset)}}{\boldsymbol{\partial t}}\right)_{\mathbf{n-1}}\right) \quad \text{(III.18)}$$

Où :
δ : Coefficient d'intégration en temps pour la méthode Newmark.
L'équation (III.16) est écrite comme suite:

$$\left(\frac{\boldsymbol{\partial(\rho\emptyset)}}{\boldsymbol{\partial t}}\right)_{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\Delta t\delta}}(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n}} - \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\Delta t\delta}}(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-1}} + \left(\mathbf{1}-\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\delta}}\right)\left(\frac{\boldsymbol{\partial(\rho\emptyset)}}{\boldsymbol{\partial t}}\right)_{\mathbf{n-1}} \quad \text{(III.19)}$$

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

$$\frac{\boldsymbol{\partial(\rho\emptyset)}}{\boldsymbol{\partial t}} = \frac{(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-2}}}{\mathbf{2\Delta t}} - \frac{\mathbf{4}(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-1}}}{\mathbf{2\Delta t}} + \frac{\mathbf{3}(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n}}}{\mathbf{2\Delta t}} \quad \text{(III.20)}$$

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

$$\frac{\boldsymbol{\partial(\rho\emptyset)}}{\boldsymbol{\partial t}} = \frac{(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n}}}{\boldsymbol{\Delta t}} - \frac{(\boldsymbol{\rho\emptyset})_{\mathbf{n-1}}}{\boldsymbol{\Delta t}} \quad \text{(III.21)}$$

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

III.4.3.2. Terme d'advection

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

III.4.3.2.1. 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 ".

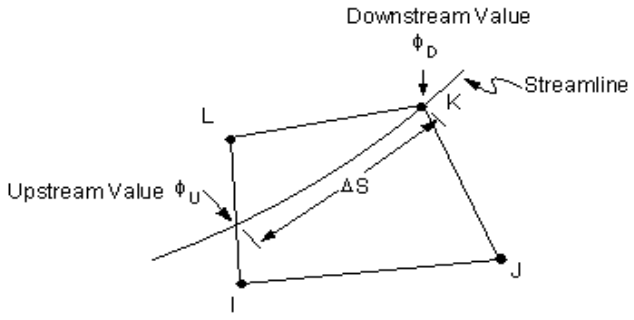


Figure III.1 : Approche de ligne de courant d'Upwind **[105].**

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 **[105]** :

$$\frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_x \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_y \emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III.22)}$$

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

$$\left[A_e^{advection}\right] = \frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)}{ds} \int W^e d(vol) \qquad \text{(III.23)}$$

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:

$$\frac{d(\rho C_{\emptyset} V_s)}{ds} = \frac{(\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_U - (\rho C_{\emptyset} V_s \emptyset)_D}{\Delta s} \qquad \text{(III.24)}$$

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 (III.1).

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

III.4.3.2.2. Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin)

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection **[105]** :

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho V_x C_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}}\int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{V_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial W^e}{\partial y}\right\}\left\{\frac{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}{\partial y}\right\} d(\text{vol}) \quad \text{(III.25)}$$

Où:

C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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

III.4.3.2.3. 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 **[105]**.

$$\left[\mathbf{A_e^{advection}}\right] = \int \mathbf{W^e}\left\{\frac{\partial(\rho \mathbf{V_x C_\emptyset \emptyset})}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial(\rho \mathbf{V_y C_\emptyset \emptyset})}{\partial \mathbf{y}}\right\}\mathbf{d(vol)} + \mathbf{C_{2\tau}} \int \frac{\mathbf{Zh}}{\mathbf{2U_{max}^e}}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e \partial W^e}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V_y^e \partial W^e}}{\partial \mathbf{y}}\right\}\left\{\frac{\mathbf{V_x^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V_y^e \partial(\rho c_\emptyset \emptyset)}}{\partial \mathbf{y}}\right\} \mathrm{d(vol)} \quad \text{(III.26)}$$

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.4.3.3. 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 **[105]**.

$$\mathbf{Diffusion\ contribution} = \int \mathbf{W^e} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}\left(\mathbf{\Gamma_\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{x}}\right)\mathbf{d(vol)} + \int \mathbf{W^e} \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}}\left(\mathbf{\Gamma_\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{y}}\right)\mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.27)}$$

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

$$\int \mathbf{W^e} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}\left(\mathbf{\Gamma_\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{x}}\right)\mathbf{d(vol)} = \int \frac{\mathbf{\partial W^e}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{\Gamma_\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.28)}$$

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

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{W_x^e} \emptyset \quad \text{(III.29)}$$

$$\mathbf{W_x^e} = \frac{\mathbf{\partial W^e}}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{(III.30)}$$

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

$$\left[\mathbf{A_e^{Diffusion}}\right] = \int (\mathbf{W_x^e \Gamma_\emptyset W_x^e} + \mathbf{W_x^e \Gamma_\emptyset W_x^e}) \mathbf{d(vol)} \quad \text{(III.31)}$$

III.4.3.4. Termes source

L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[105]**:

$$S_{\emptyset}^{e} = \int W^{e} S_{\emptyset} d(vol) \qquad \text{(III.32)}$$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes thermiques ont été exposées, l'équation de transport par la méthode des éléments finis a été discrétisée pour la mettre sous la forme algébrique.

Chapitre IV :
Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous avons présenté des résultats d'écoulement jet de plasma d'argon décharge dans l'air, et des résultats de l'étalement d'une particule creuse d'aluminium, et on s'est intéressé de présenter l'effet de l'inclinaison du substrat. Les résultats faits à partir d'une simulation numérique à l'aide d'un logiciel, c'est le code ANSYS.

IV.1 ANSYS

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

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

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 logicuels CAO du marché : en format natif avec Catia V4 et V5, Solid Edge, NX-Unigraphics, Pro/Engineer, SolidWorks, 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.

Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux

- ANSYS DesignSpace est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces les constituants.
- ANSYS Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires : mécaniques et thermiques. Il comprend des outils de contrôle avancés tels que les options de contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, les combinaisons de solution, le post traitement de zones de contacts.

- ANSYS Structural et Mechanical permettent d'accéder à tous les types de non linéaire : matériaux, grandes déformations et grands déplacements. Ils sont dédiés à des utilisateurs confirmés qui disposent de connaissances théoriques sur les éléments finis.

Schéma de logiciel ANSYS

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

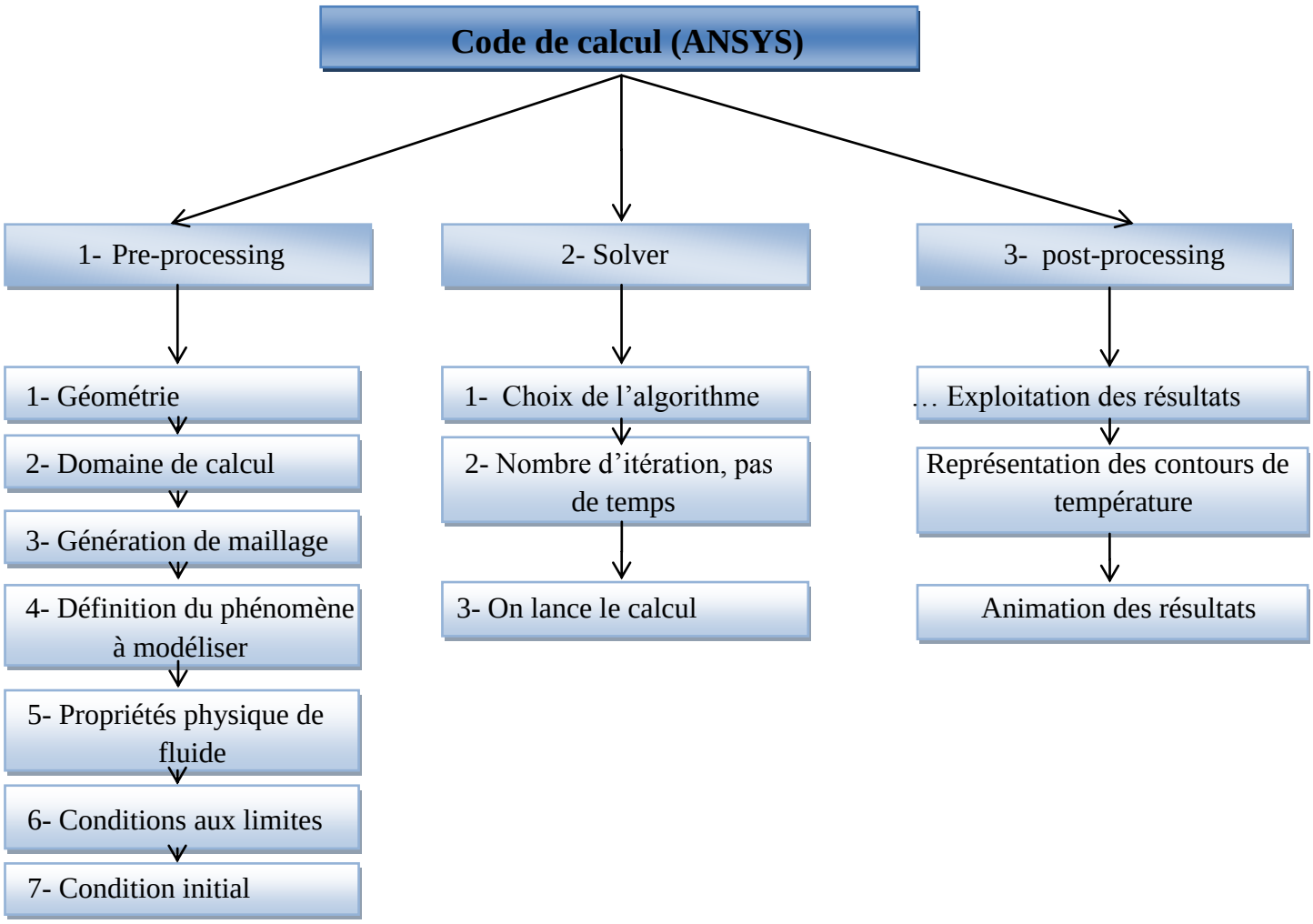
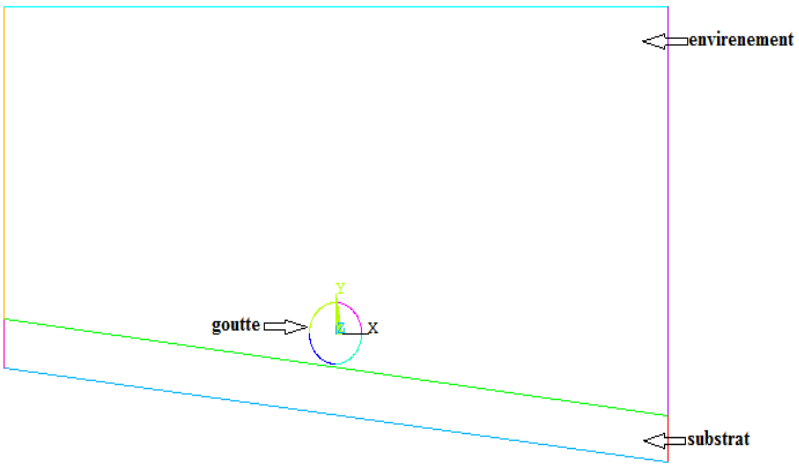


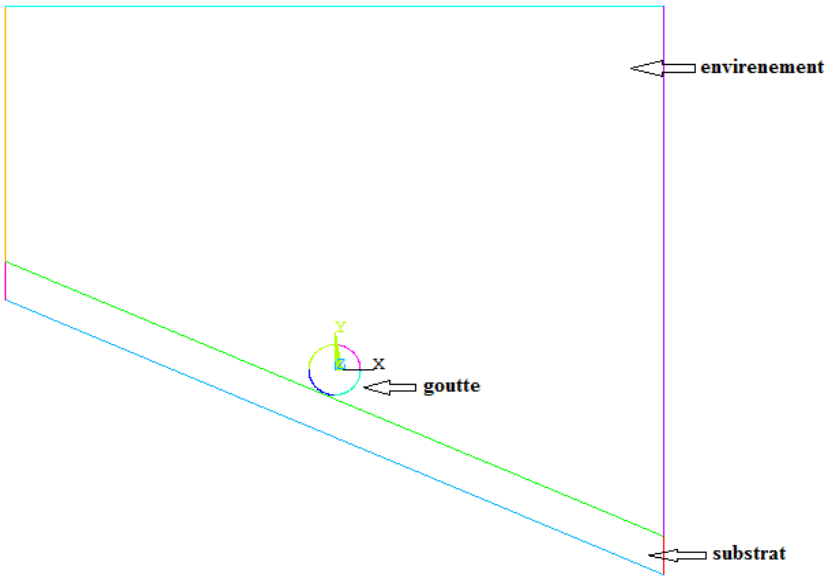
Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.2 Description du domaine d'application

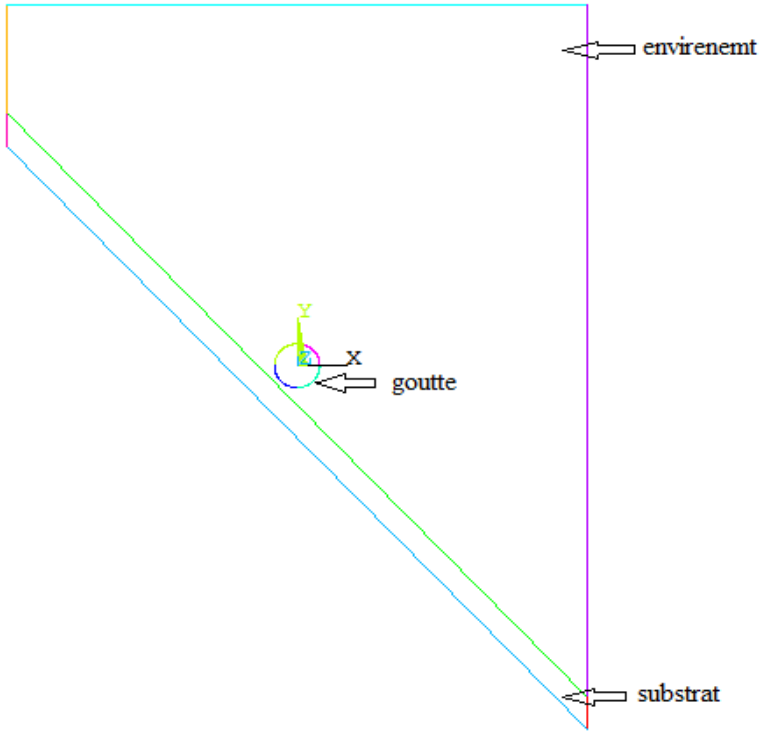
Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact d'une particule en aluminium creuse (bulle d'air) déposée sur un substrat incliné 15°, 30°, 45° en acier



Substrat incliné 15°



Substrat incliné 30°



Substrat incliné 45°

IV.3 Matériaux utilisés :

Dans cette étude numérique nous sommes intéressés à des particules d' aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat métalliques (acier d'outil) le choix de l'aluminium a été orienté par des nombreuses études déjà menées ,telle que les travaux expérimentaux de Minxia Xue ,Yoav Heichal ,Sanjeev Chandra et javad Mostaghimi **[106**,**107]**qui ont été consacrés à l'étude de formation d'une lamelle individuelle d'aluminium sur substrat en acier ;et qui sera l'objet d'identification de nos résultats.

IV.3.1 l'aluminium :

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

* une bonne tenue mécanique aux températures élevées, et une chaleur latente de fusion importante de l'ordre de $1{,}09.10^{6}$ j/kg.

* une bonne résistivité électrique >1012 Ohm.m **[108**,**107]**

* une dureté HV sous une charge de 1N de 9,21 GPa **[108**,**107]**

* une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10 – $5mm^3/Nm$, à l'abrasion par une bille de Sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5 N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à 3.10^{-3} mm^3 /Nm lorsque la température augmente à $400^{O}C$ **[108**,**107]**

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

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

* les applications mécaniques, l'aluminium est l'abrasif le plus répandu a coté du carbure de silicium. Elle est utilisée aussi contre l'usure et la corrosion par des particules solides. **[108**,**107]**

* les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion a haute températures. **[108**,**107]**

* les applications médicales ; le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie **[108**,**107]**

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

*les applications optiques : 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 **[108**,**107]**

IV.3.2 propriétés des particules à l'impact

Pour l'aluminium

$$\rho = 2.79.10^{3}\,[1- 4{,}22.10^{-5}\,(T - T_f)] \qquad \text{(IV.1)} \quad \textbf{[109,110]}$$

$$\mu = 2{,}87.10^{-9} T \exp\,(2{,}05.10^{4}/\,T) \qquad \text{(IV.2)} \quad \textbf{[109,110]}$$

Pour l'acier

$$\rho = 0{,}9246.10^{4} - 1.481T + 1{,}425\,(T/100)^{2} \qquad \text{(IV.3)} \quad \textbf{[109,110]}$$

$$\mu = 0.3162.10^{-3} \exp\,(5.004.10^{3}/T) \qquad \text{(IV.4)} \quad \textbf{[109,110]}$$

Les équations (IV.3) et (IV4) concernent, plus exactement, le fer pur mais ont été adoptées pour l'acier 316L compte tenu des valeurs voisines de densité et de viscosité entre le fer et

l'acier 316L liquide .ainsi que pour le calcule numérique on a utilisé les propriétés thermo physique représentées sur le tableau IV.1

Propriétés	Alliage d'aluminium	Acier d'outil
Densité (kg/m^3)	2570	7800
Température de fusion en ^oc	570	-
Chaleur de fusion [j/kg]	389	-
Viscosité cinématique en $[m^2/s]$	^oc 0 4.5E-7 700 4E-7	-
Conductivité thermique liquide [W/m K]	70	-
Chaleur spécifique liquide [j/kg k]	1000	-
Tension superficielle [N/m]	1.07	-
Conductivité thermique solide [W/m K]	^oc 100 144.5 200 147.5 300 152.5 400 148	^oc 27 17.6 204 23.4 427 25.1 649 26.8
Chaleur spécifique [j/kg k]	^oc 300 980 400 1050 479 1150	^oc 20 460 500 550 600 590

Tableau IV.1 : propriétés thermo physique d'alliage d'aluminium et de l'acier H13. **[106]**

IV.4 impact d'une particule d'aluminium totalement fondus

La figure IV.2 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°C et une vitesse de 3 m/s sur un substrat en acier initialement à 200°C. La gouttelette commence a se propagée à 0.1 ms, le liquide suit la topographie de la surface

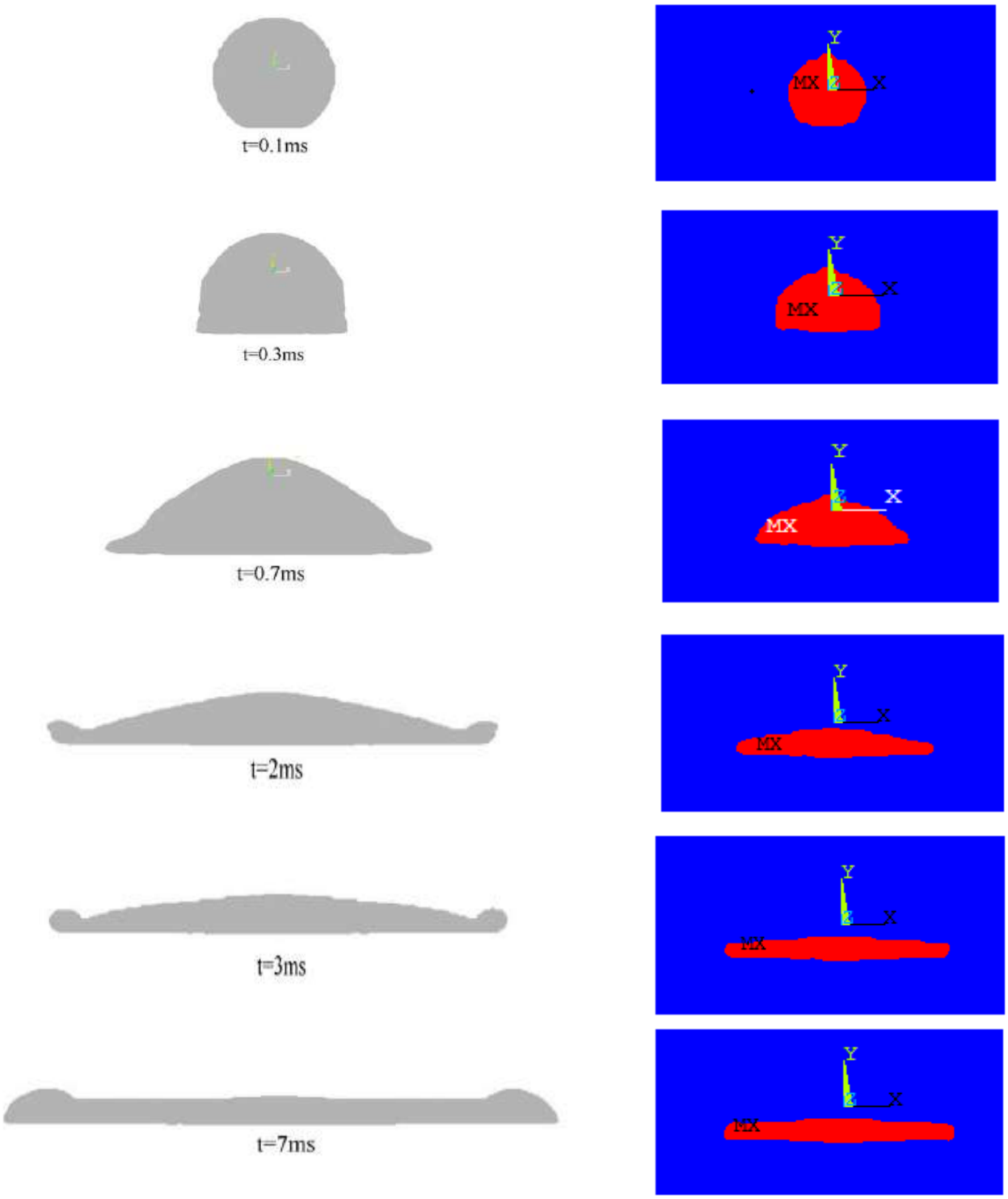


Figure IV.2 : impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement à 200°C

La figure IV.3 représente comparaison entre les facteurs d'étalement de notre simulation avec simulation [16]. (l'article M. Zirari [a], A. Abdellah El-Hadj [b,*], N. Bacha [c])

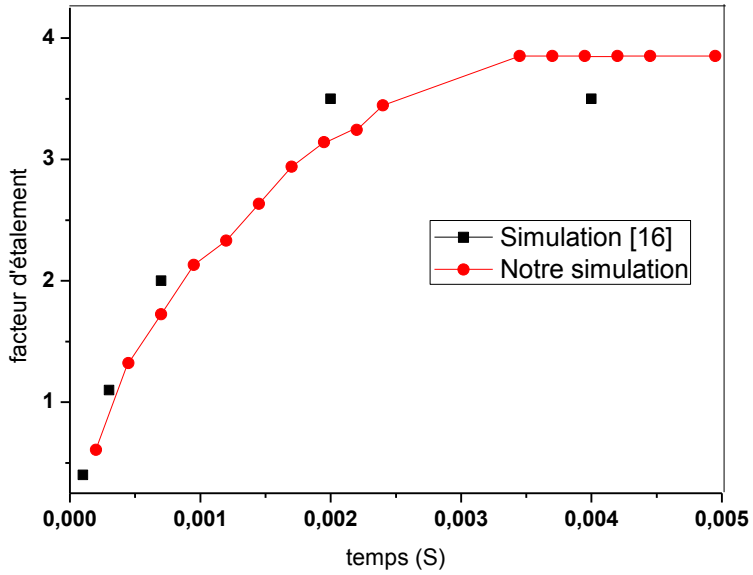


Figure IV.3: comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions.

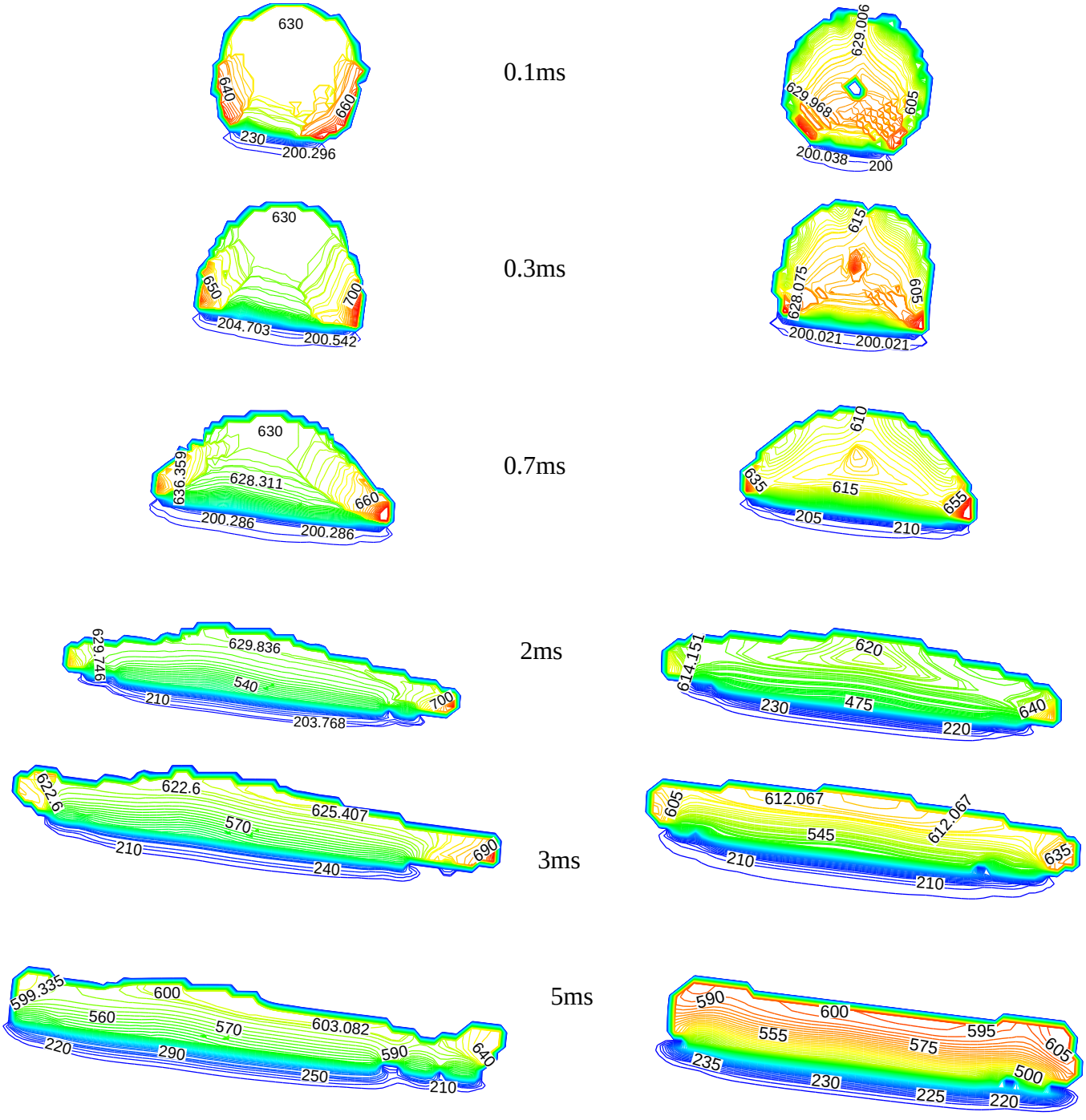
En vue de l'étude de l'influence du degré d'inclinaison du substrat sur l'impact d'une particule totalement fondue **normale** ou **creuse** nous avons été appelé :

- A utiliser trois angles d'inclinaison du substrat différents (15°,30°, 45°) et pour chacun nous avons :
  - Représenté les variations du facteur d'étalement par rapport au temps.
  - Représenté les variations de pression au point d'impact par rapport au temps.
  - Représenté les variations de température pour cinq positions dans le substrat et cela par rapport au temps.
  - Représenté le profile de température au point d'impact.

IV.4.1. Substrat incliné 15°

La figure IV.4 représente la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette respectivement normale et creuse qui ont une température de 630° dans un substrat incliné 15° à 200 C°. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard.

Particule normale | Particule creuse



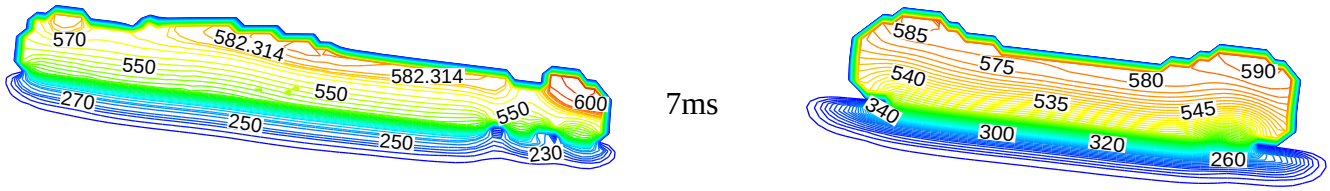


Figure IV.4 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat incliné 15° à 200°C avec une vitesse de 3m/s.

La figure IV.5 compare le facteur d'étalement de la goutte d'aluminium dans le modèle proposé **normale** et **creuse**

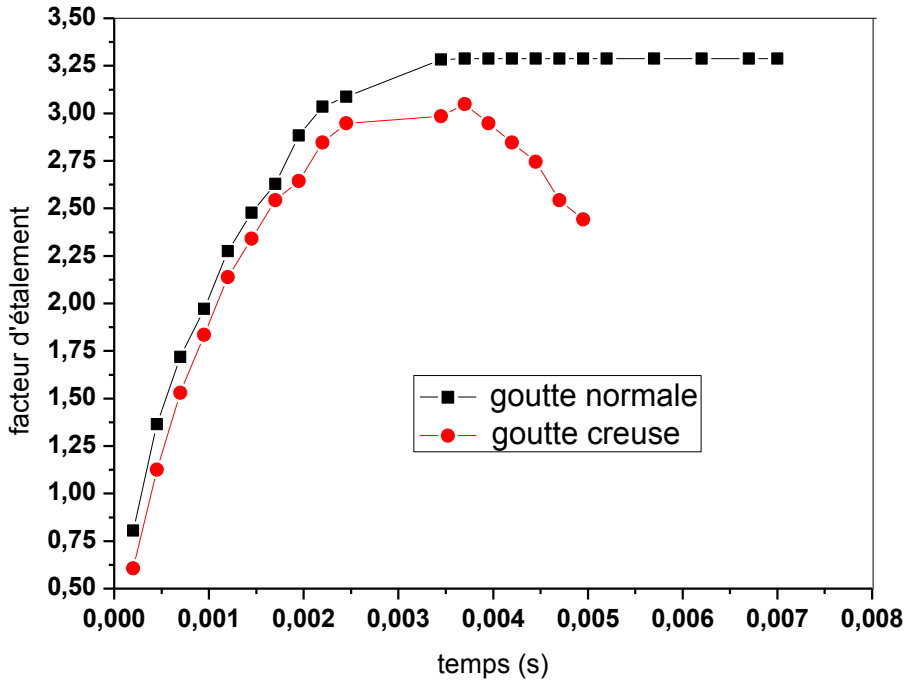


Figure IV.5 : comparaison entre les facteurs d'étalement des deux cas pour substrat incliné 15°.

L'étalement des deux gouttes est le même au cours de l'impact jusqu'a l'instant t =3.7ms, la pour goutte normale il se stabilise et prend la forme de l'étalement final par contre pour la goutte creuse il rechute. Cette rechute est caractérisée par l'apparition de rebond comme le représente la figure IV.4 à t=7ms.

De plus, la figure IV.6 illustre les distributions de la pression au point d'impact au cours de l'étalement de la goutte.

1. Dans le cas d'une goutte normale la pression augmente attient le seuil puis rechute conformément à la norme, ce qui implique une bonne interaction goutte/substrat. Il faut monter ici que l'augmentation de pression à l'impact dans la forme (normale) est plus importante que celle dans la forme (creuse).
2. Dans le cas d'une goutte creuse la pression augmente très rapidement, avant de rechuter puis regagner l'augmentation.

a) la 1er augmentation s'explique par l'impact de la partie de la matière de la goutte située avant la bulle d'air.

b) la chute est causée par l'enveloppe d'air dans la quelle la pression est atmosphérique.
c) la 2^{éme} augmentation est due à l'arrivée de la deuxième partie de la matière de la goutte située après la bulle d'air.

On peut dire donc que la forme normale est plus efficace pour l'amélioration de l'adhérence, c'est à dire pour former un bon dépôt. Alors que les fissures et les défauts de contact son causés par la forme creuse. Donc l'influence de l'état de la goutte est beaucoup plus important que l'angle d'inclinaison de 15°.

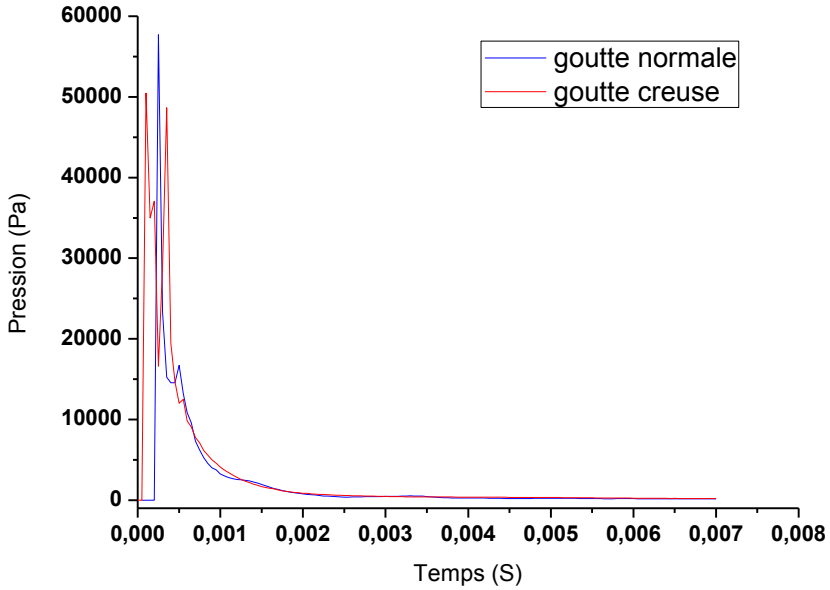


Figure IV.6 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux cas incliné 15°.

Les Figures **IV.7 - IV.8** représentent les profiles de température pour cinq position dans le substrat respectivement pour la goutte **normale** et **creuse**

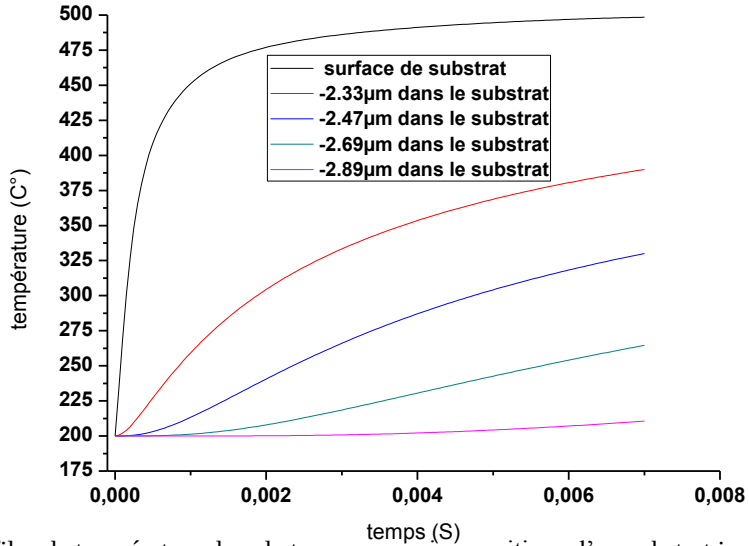


Figure IV.7 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 15° à 200 C° pour une particule normale totalement fondue.

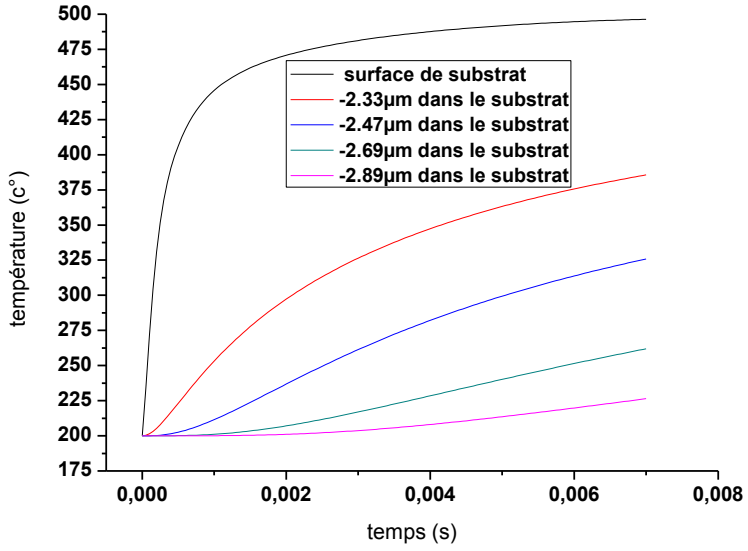


Figure IV.8 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 15° à 200 C° pour une particule creuse totalement fondue.

Les figures IV.7, IV.8 montrent l'apparition des zones de bon et de mauvais contact a l'interface particule/substrat ce qui favorise le transfert de chaleur transversal vers le substrat et nom pas radialement dans la lamelle cela explique la température quasi-constante en profondeur du substrat.

On peut constater aussi que, aux premiers instants suivants le premier contact de la goutte avec la cible, la température de substrat au point d'impact augmente rapidement. Puis suite à un étalement partiel, la température de substrat augmente beaucoup plus lentement alors que celle de la surface de la goutte s'abaisse comme le montre la figure IV.9 ceci et expliqué par un transfert de chaleur goutte/substrat, donc la résistance de contact associée augmente.

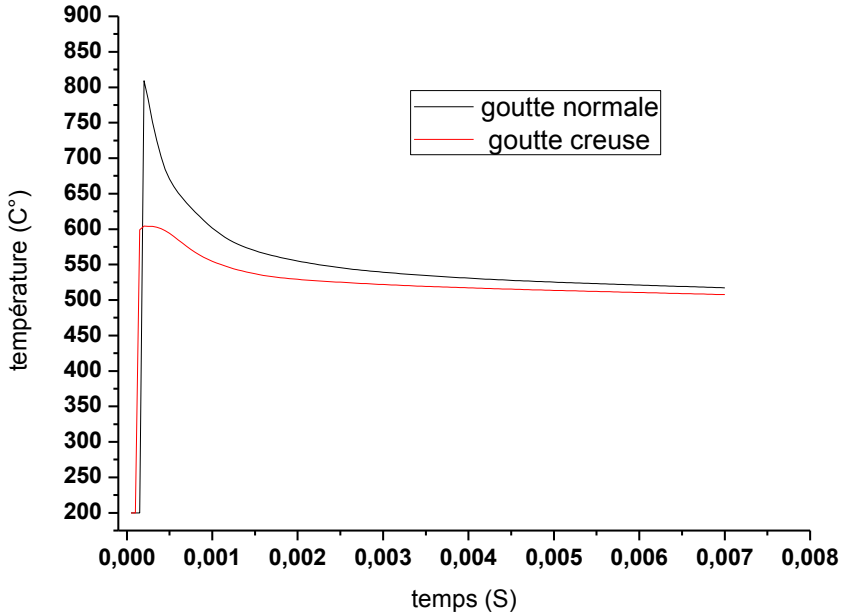
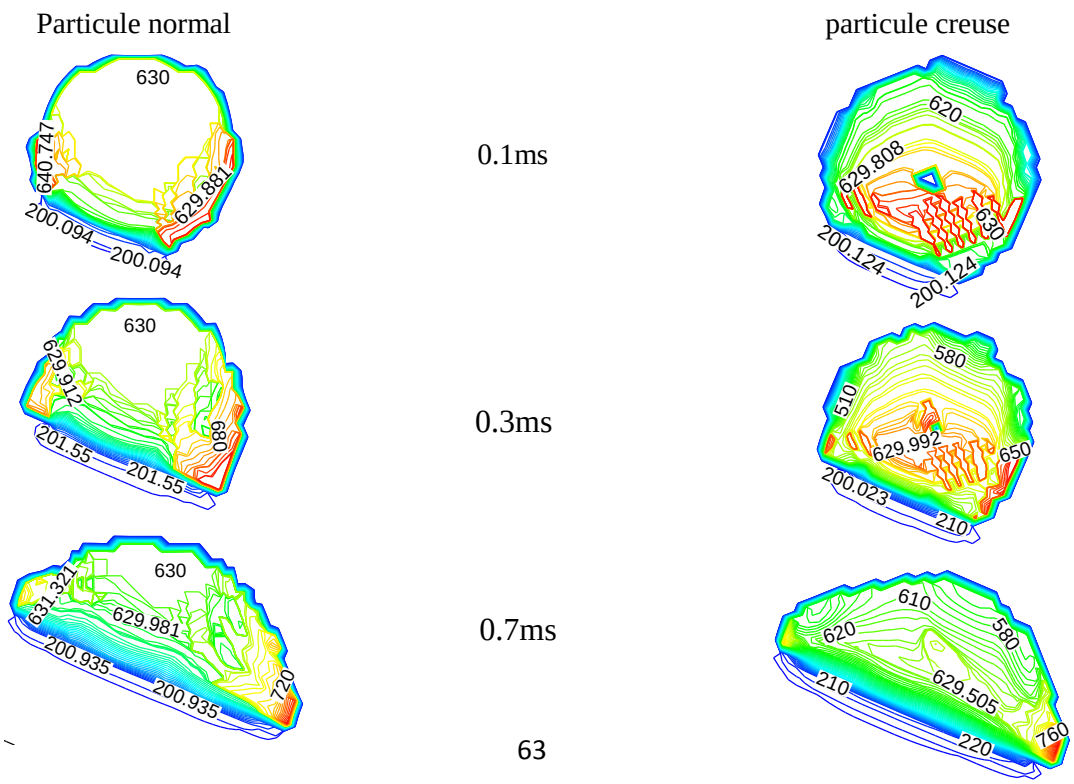


Figure IV.9 : Résultats de simulation pour les profiles de température au point d'impact dans les deux formes sur substrat incliné15°

IV.4.2. Substrat incliné 30°

La figure IV.10 représente la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette respectivement normale et creuse qui ont une température de 630° dans un substrat incliné 30° à 200 C°. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard.



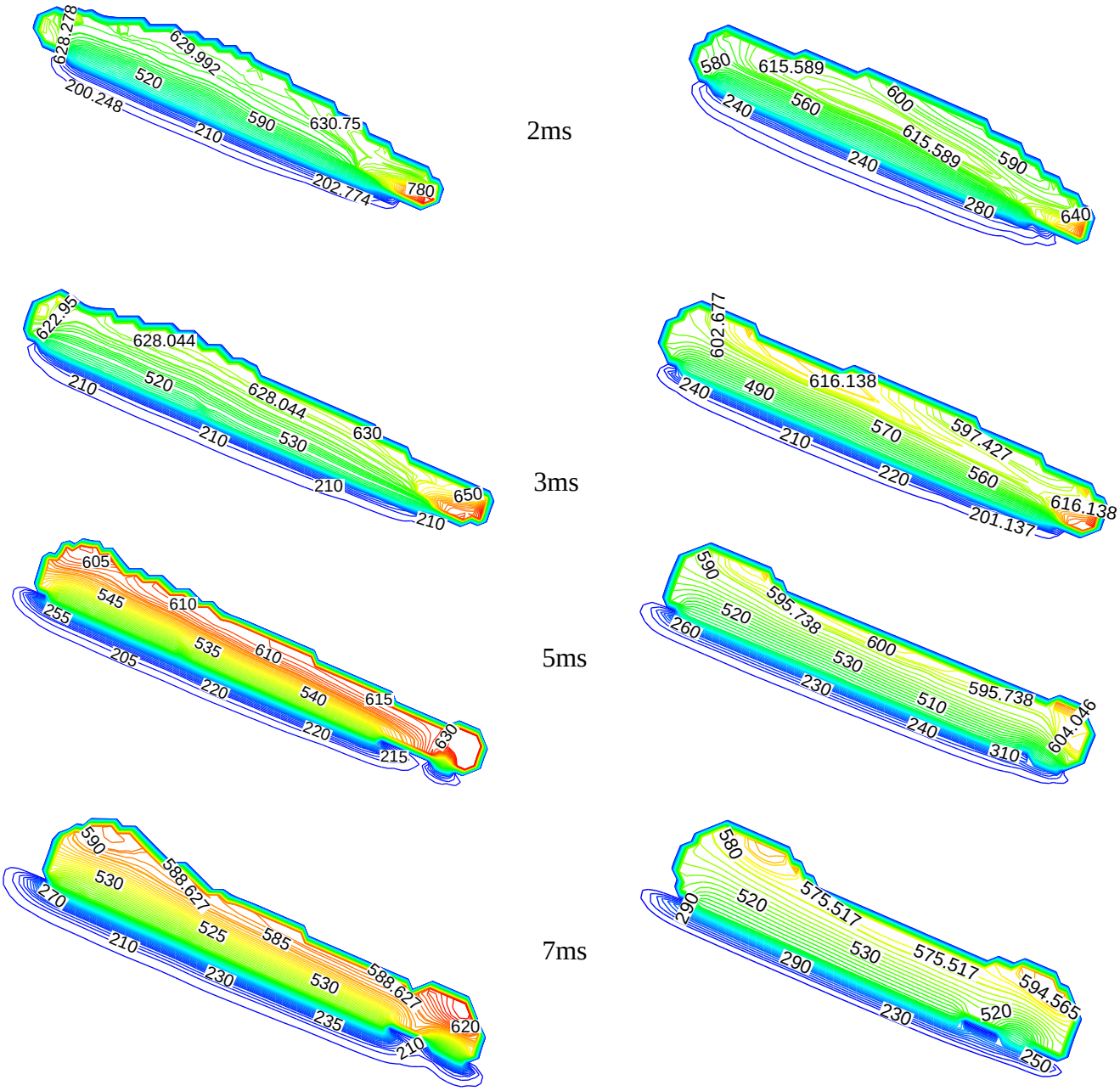


Figure IV.10 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat incliné 30° de 200°C avec une vitesse de 3m/s.

La figure IV.11 compare le facteur d'étalement de la goutte d'aluminium dans le modèle proposé **normale** et **creuse**.

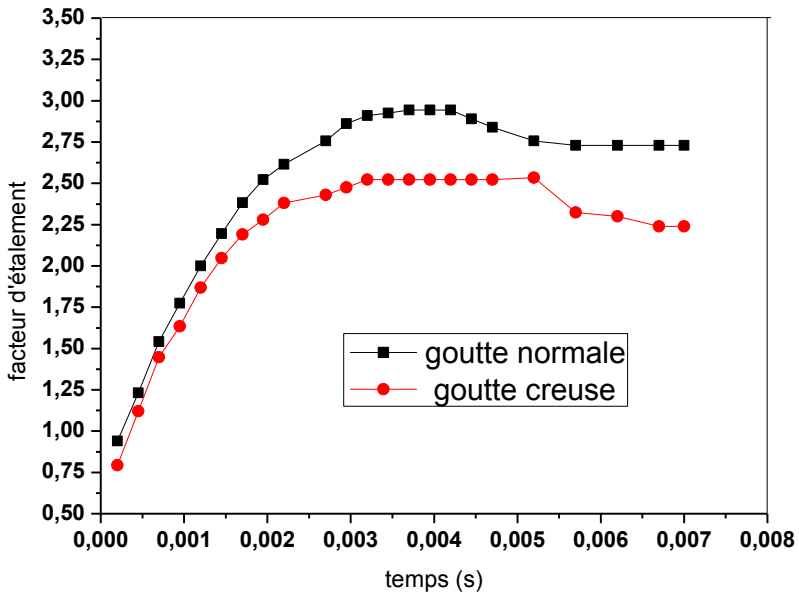


Figure IV.11: comparaison entre les facteurs d'étalement des deux cas pour substrat incliné 30°.

L'étalement des deux gouttes d'aluminium n'a pas attient le seuil conforme à la norme mais cela n'empêche pas que la goutte normale garde un facteur d'étalement plus élevé que la goutte creuse est du à la bulle d'air, à t=45ms le degré d'étalement diminue pour les deux goutte de manière plus important pour la goutte creuse , ce qui provoque l'apparition de rebond moins important que pour l'inclinaison 15° comme le montre la figure IV.10 à t=7ms cette diminution de l'étalement s'explique par le glissement de la goutte sur le substrat incliné à 30°.

La figure IV.12 représente les résultats numérique des profiles de pression au point de contact, nous remarquons aussi, initialement la pression est plus élevé au point d'impact (sous la lamelle) qui produit une faible résistance de contact (bonne interaction goutte /substrat) pour la forme normale et creuse puis elle se désintègre vers zéro très rapidement.

- Pour la goutte creuse, la pression rechute, comme nous lavons déjà dit, à cause de la bulle d'air, mais l'augmentation suivante est moins importante par rapport au substrat incliné 15°. Cela est probablement du au glissement de la goutte.

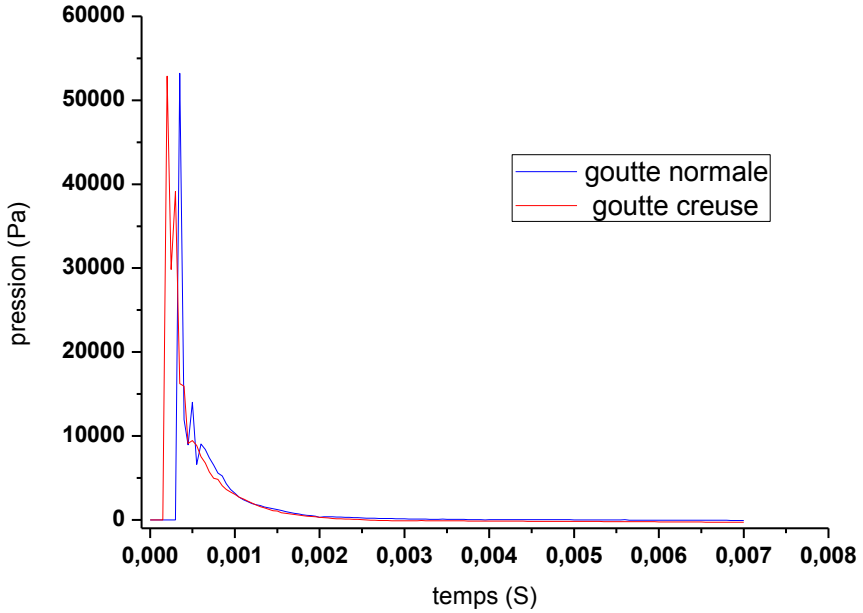


Figure IV.12 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux cas incliné 30°.

Les Figures **IV.13 IV.14** représentent les profiles de température pour cinq position dans le substrat respectivement pour les deux forme (**normale** et **creuse)**.

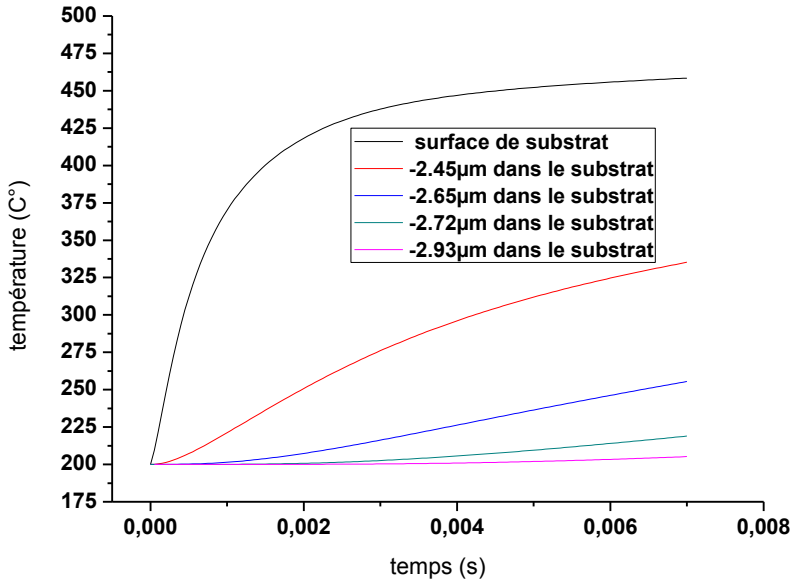


Figure IV.13 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 30° pour une particule normal totalement fondue.

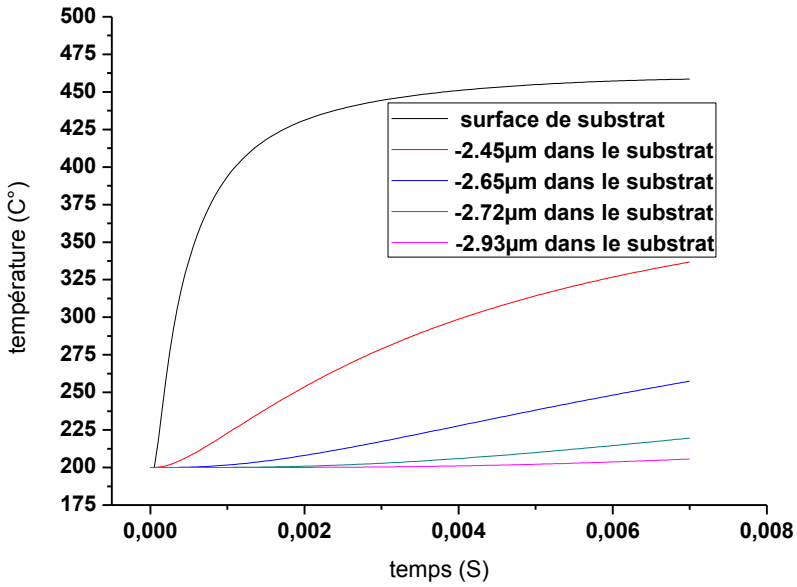


Figure IV.14 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 30° pour une particule creuse totalement fondue.

On note que la température de substrat augment pour les cinq positions mais de manière moins importante que dons un substrat incliné à 15°. Cela est peut être causé par le glissement de la particule.

On note également que la température de la goutte d'aluminium n'a pas attient la même valeur que dans un substrat incliné a15°, comme le montre la figure IV.15 cette perte de chaleur important est du au glissement de la goutte.

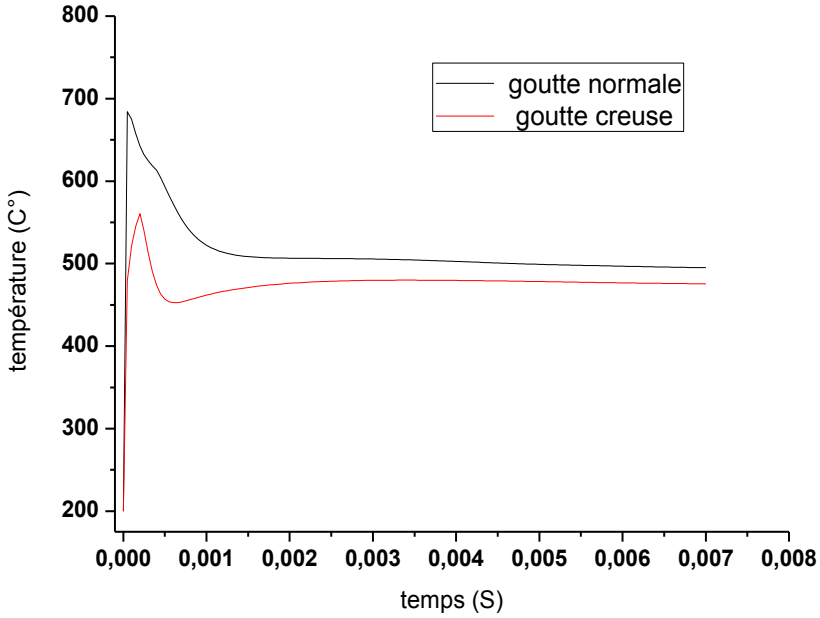
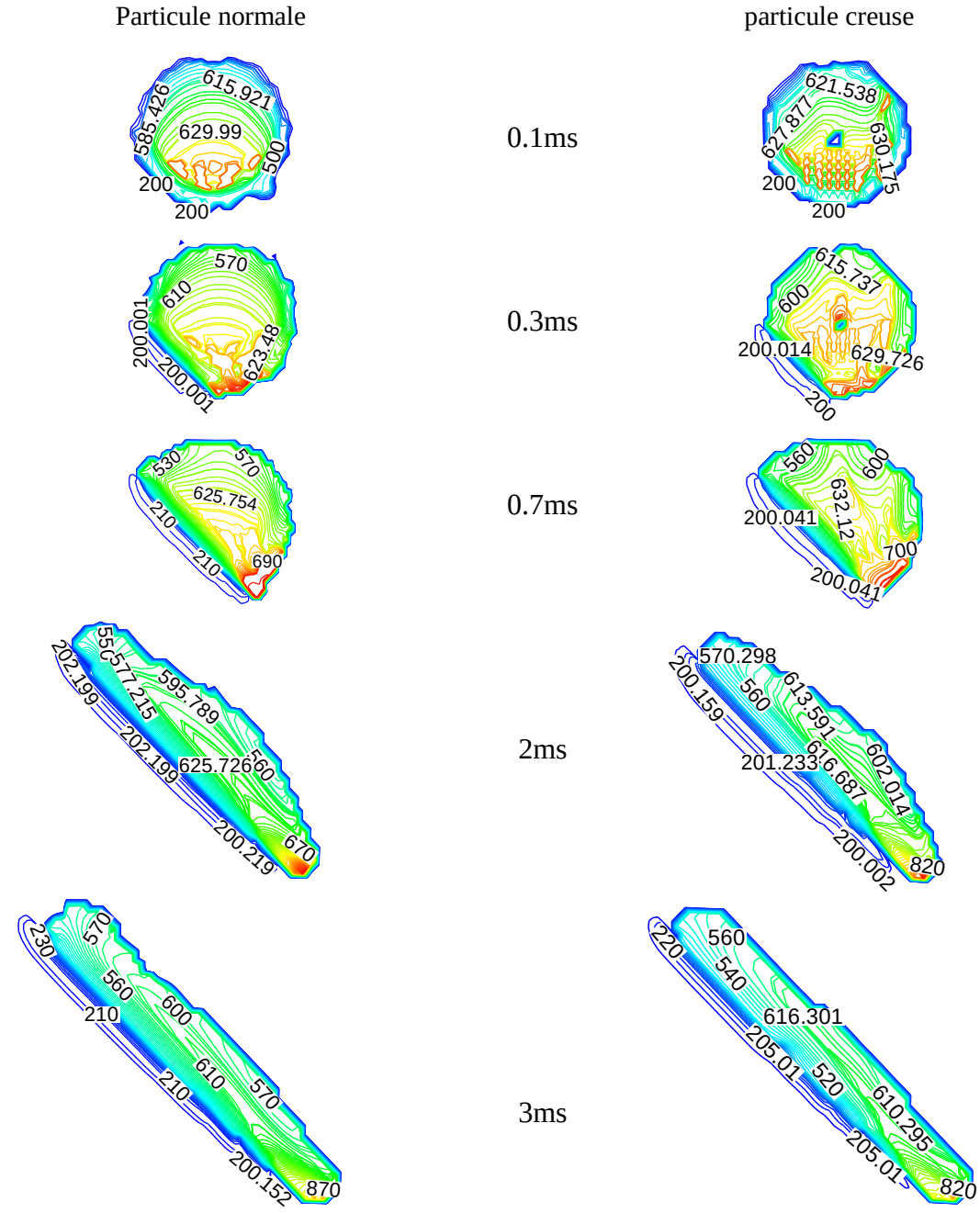


Figure IV.15 : Résultats de simulation pour les profiles de température au point d'impact dans les deux formes sur substrat incliné 30°

VI.4.3. Substrat incliné 45°

La figure IV.16 représente la distribution de température pendant l'impact d'une gouttelette respectivement normale et creuse qui ont une température 630° dans un substrat incliné 45° à 200 C°. Où le modèle de transfert thermique utilisé a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retard.



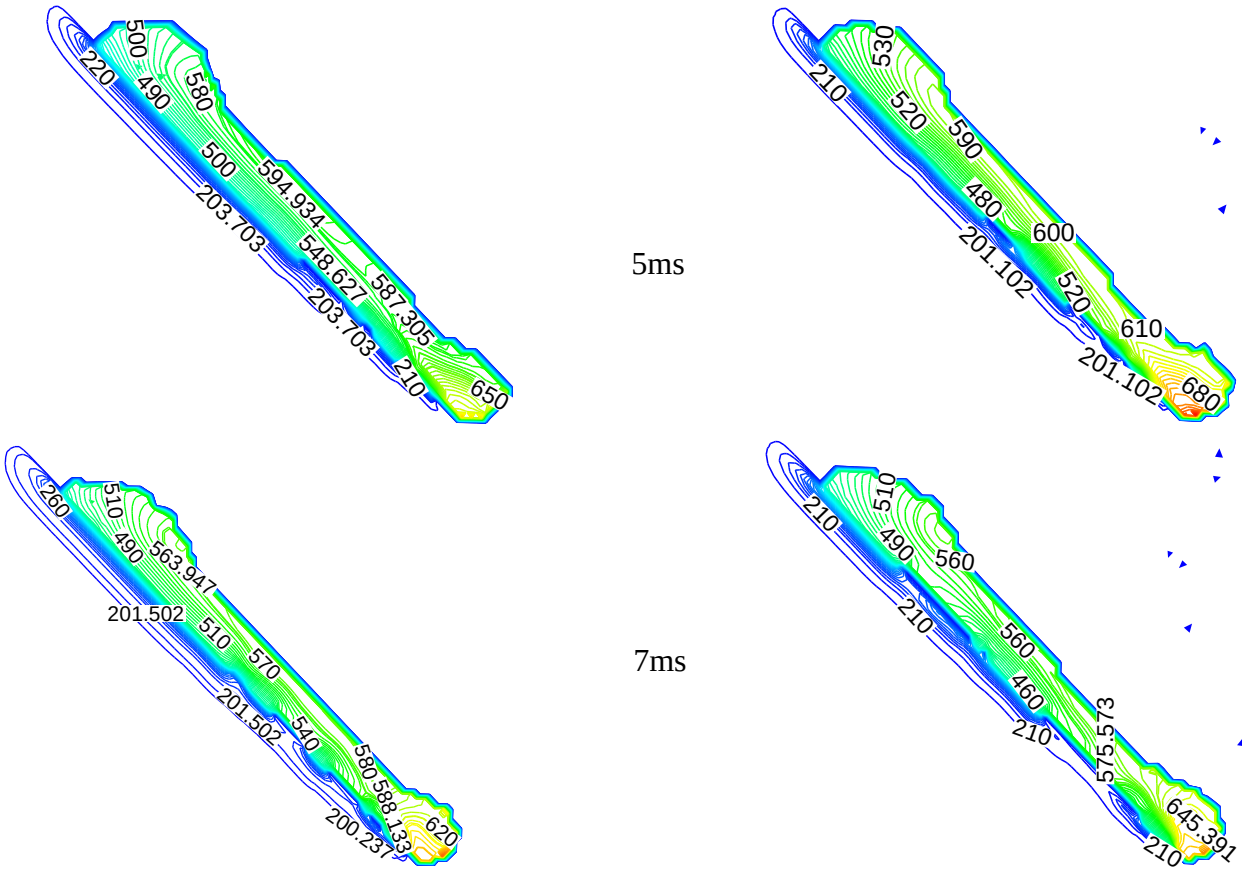


Figure IV.16 : distribution de la température lors de l'impact d'une goutte d'aluminium de 3.32 mm de diamètre sur un substrat incliné 45° de 200°C avec une vitesse de 3m/s.

La figure IV.17 compare le facteur d'étalement de la goutte d'aluminium dans le modèle proposé **normale** et **creuse**

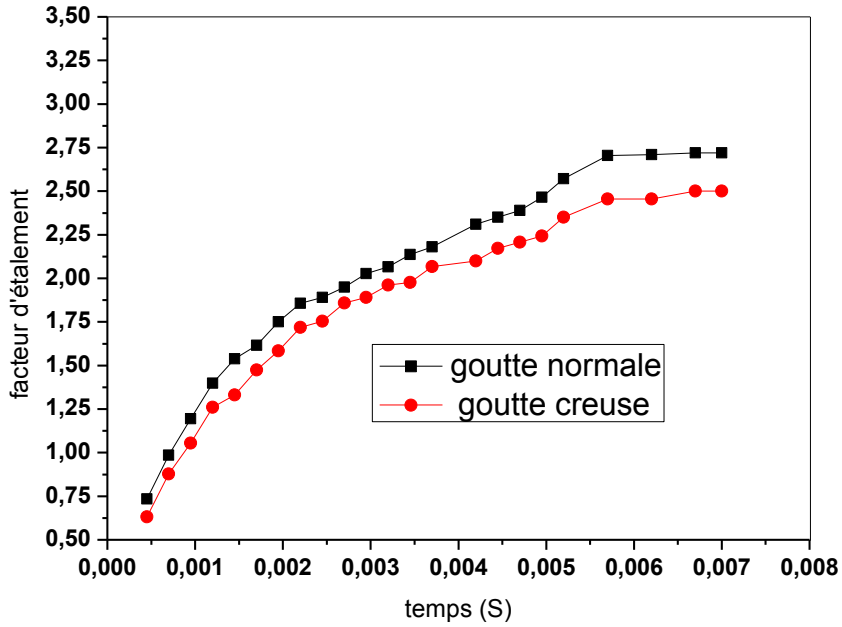


Figure IV.17: comparaison entre les facteurs d'étalement des deux cas pour substrat incliné 45°.

L'étalement des deux gouttes est très faible par rapport aux normes (simulation [16]) cela pour les deux forme **normale** et **creuse**, cette faiblesse due au glissement très important de la particule sur le substrat incliné 45°, a t=5.5ms les facteurs d'étalement des deux goutte le stabilise ce qui implique une dilatation légère accompagné toujours de glissement qui se manifeste par des lamelles hétérogènes donc un mauvais dépôt.

La figure IV.18 représente les résultats numériques des profiles de pression au point de contact, la pression de la goutte **normale** est beaucoup plus importante que celle de la goutte **creuse** de même cette différance de pression est influencée par la forme de la goutte à un degré plus marquant que par l'angle d'inclinaison.

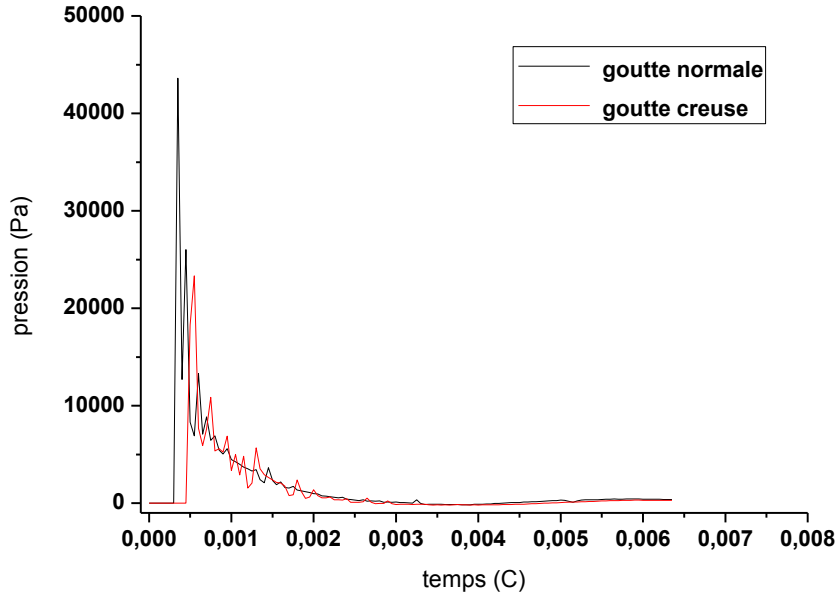


Figure IV.18 : Résultats de simulation pour les profiles de Pression au point d'impact dans les deux cas incliné 45°.

Les Figures **IV.19 & IV.20** représentent les profiles de température pour cinq position dans le substrat respectivement pour les deux forme (**normale** et **creuse)**.

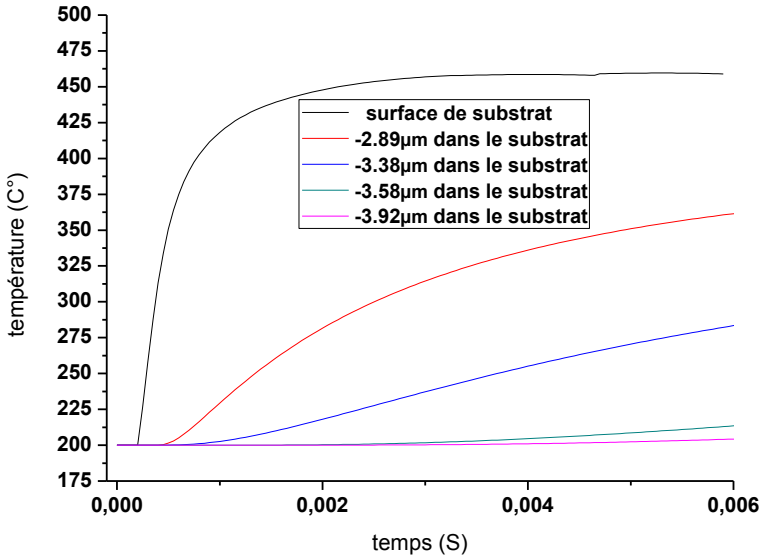


Figure IV.19: profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 45° pour une particule normal totalement fondue.

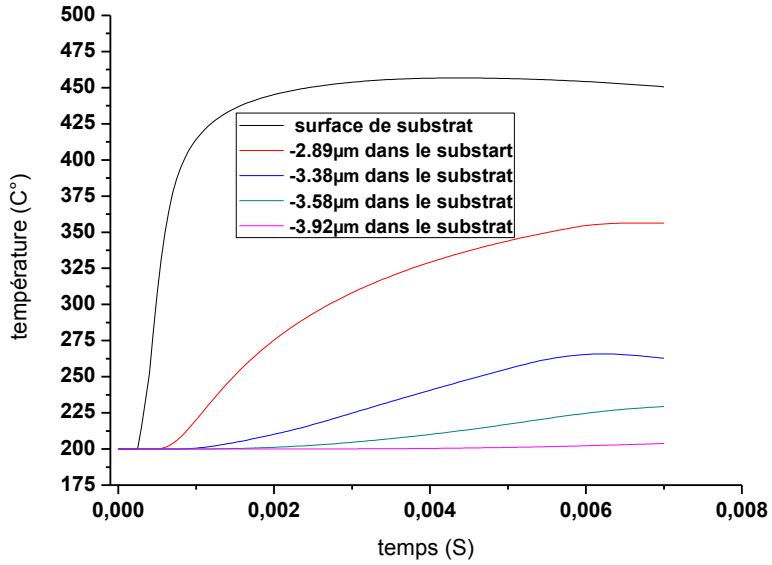


Figure IV.20 : profiles de température dans le temps pour cinq positions d'un substrat incliné 45° pour une particule creuse totalement fondue.

On remarque que la température du substrat augment dans le cas de la goutte creuse une baisse de température à t=6ms contrairement à la goutte normale cela est probablement du au glissement de al goute creuse qui est pouls rapide que la goutte normale.

On constat également que la température de la goutte (**normale** et **creuse**) est plus faible que dans le substrat incliné a 30°, expliquée toujours par un glissement plus important (figure IV.21)

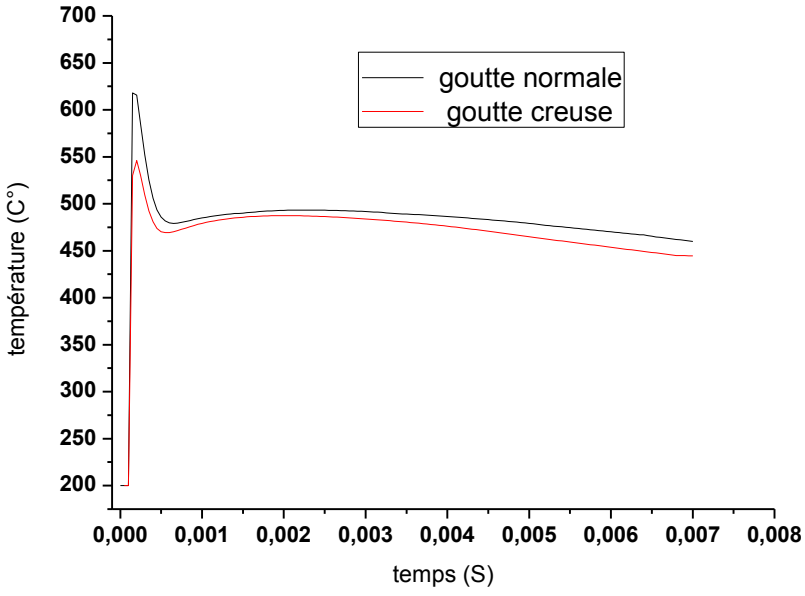


Figure IV.21 Résultats de simulation pour les profiles de température au point d'impact dans les deux formes sur substrat incliné 45°

IV.5 Comparaison des Résultats

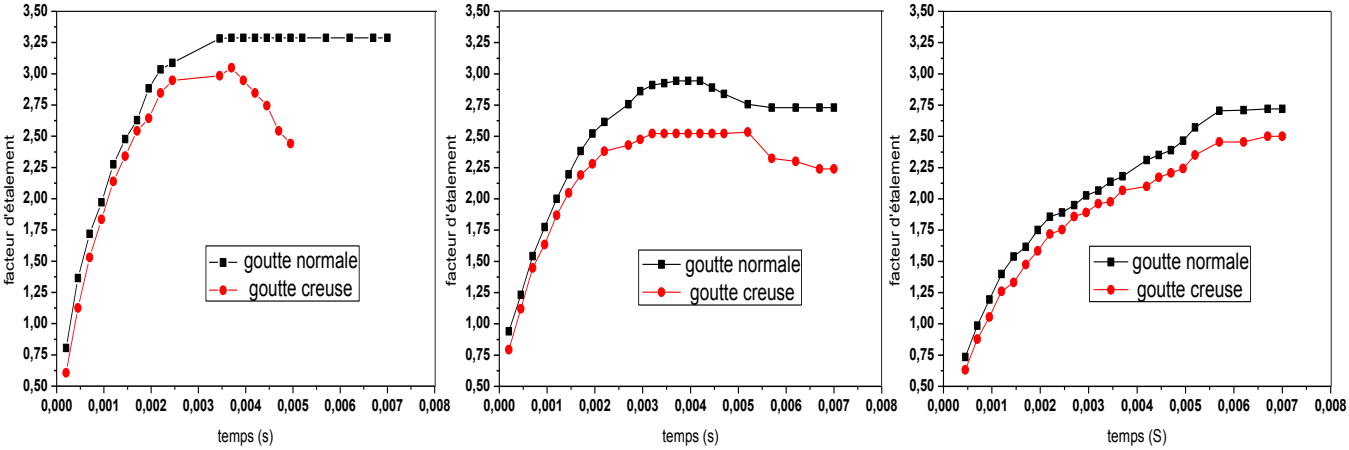


Figure IV.22: Comparaison entre les facteurs d'impact dans chaque forme pour les trois cas.

Les résultats numériques ont montré que la forme de la goutte joue un rôle important pour son étalement, de même l'angle d'inclinaison du substrat a une influence plus importante

Plus le substrat est incliné plus le glissement de la goutte est important ce qui provoque la diminution du facteur d'étalement caractérisé par un défaut de contact entre les lamelles se manifestons par des fissures ou mauvais dépôt.

Conclusion

Un dépôt réalisé par projection thermique résulte d'un empilement successif de lamelles individuelles qui constituent l'élément fondamental de la construction du dépôt.

Cette partie du travail expose donc l'influence de l'angle d'inclinaison du substrat sur la formation des lamelles pour une goutte **normale** et **creuse**

- La forme de la gouttelette d'aluminium joue un rôle sur l'étalement de la lamelle est que nous avons adapté le meilleur étalement dans la forme normale.
- L'angle d'inclinaison du substrat est d'une importance cruciale dans la formation des lamelles
- Un substrat incliné à 15° est meilleur pour obtenir un bon dépôt par rapport à 30°et 45°

Conclusion générale

Conclusion générale

La pulvérisation de gouttelettes métalliques ou céramiques sur un substrat en vu de la fabrication d'un revêtement fin et un procédé industriel largement utilisé.

Dans ce travail, notre objectif était d'étudier les phénomènes de la projection par plasma de dépôts d'aluminium ainsi que leurs propriétés reliées à l'impact de goutte **normale** et **creuse** et également la solidification rapide d'une lamelle sur un substrat incliné15°,30°,45°.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié la projection thermique, ses paramètres et ses caractéristiques, nous avons été appelés également à étudier la solidification de la lamelle suite à son étalement après l'impact qui confère différent caractéristiques aux dépôts.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les équations des modèles dynamique et thermique. La configuration du domaine à été choisie en 2D cartésien.

Nous avons consacré le troisième chapitre à la résolution numérique et les méthodes de calcule.

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

- L'état de la goutte selon qu'elle soit **normale** ou **creuse** joue un rôle important sur la morphologie de la lamelle
- L'impact d'une goutte creuse influence sur l'étalement et engendre l'apparition de rebonds.
- La pression augmente conformément à la norme pour la goutte normale contrairement à la chute observée dans le cas d'une goutte creuse
- Les températures du substrat et de la goutte sont inversement proportionnelles à cause du transfert de chaleur.
- Un substrat incliné à15° a un effet négligeable sur l'impact des gouttelettes par rapport à la forme de celles-ci.
- Un substrat incliné à 30°joue un rôle important sur le facteur d'étalement qui diminue sur la pression qui diminue rapidement, sur l'augmentation modérée de la température du substrat provoquée par le glissement de la particule.
- Un substrat incliné à 45° affaiblit l'étalement, la pression la température de la goutte ces remarques sont plus importantes pour la goutte creuse.
  Donc une inclinaison importante fait apparaître le défaut d'une particule creuse puisque celle-ci glisse plus rapidement que la particule normale.

Suite à ce travail il serait intéressant d'étudier l'influence de la vitesse de la particule lors de son impact.

Une variation de température du substrat tout en étant incliné et son effet mériteraient d'être soulignés.

Nomenclature

Lettres latines

Notation	Signification	Unité
a	Diffusivité thermique	[m².s^{-1}]
Cp	Capacité calorifique massique à pression constante	[m².$s^{-2}.K^{-1}$]
D	Diamètre de goutte	[m]
D_g	Distance entre deux gouttes voisines	[m]
D_i	Diamètre initial de goutte	[m]
E_c	Energie cinétique	[N.m]
E_p	Energie potentielle	[N.m]
f_s	Fraction solide	
F_o	Nombre de Fourier thermique	
g	Accélération de pesanteur	[m. s^{-2}]
h	Hauteur de goutte	[m]
H	Enthalpie	[J]
K	Nombre de Sommerfeld	
m	Masse	[Kg]
Oh	Nombre d'Ohnesorge	
P_c	Nombre de Peclet	
P_r	Nombre de Prandtl	
r	rayon de goutte	[m]
R_a	Nombre de Rayleigh	
R_e	Nombre de Reynolds	
R_{TC}	Résistance thermique de contact	[K.m².W^{-1}]
S_c	Terme source ou puits changement de phase	[W. m^{-3}]

Ste	Nombre de Stefan	
T	Température	[°K]
T	Temps	[s]
u_i	Composante de la vitesse instantanée suivant i	[m. s^{-1}]
V	Volume	[m^3]
V_i	Vitesse d'impact	[m. s^{-1}]
v_{ref}	Vitesse de refroidissement en DSC	[K. min^{-1}]
W_e	Nombre de Weber	
x_i	Coordonnée cartésienne suivant la direction i,x,y,z	[m]
z	Altitude	[m]

Lettres grecques

α	Fraction cristalline	
β	Coefficient de compressibilité	[K^{-1}]
θ	Angle de contact	[°]
λ	Conductivité thermique	[W. m^{-1}. K^{-1}]
Φi	Fonction de présence des fluides	
σ	Tension superficielle	[$N. m^{-1}$]
μ	Viscosité dynamique	[$Pa.s$]
$\emptyset$	Variable généralisée	
$C_\emptyset$	Coefficient d'advection transitoire	
$\Gamma_\emptyset$	Coefficient de diffusion	
ρ	masse volumique	[$kg.$ m^{-3}]

Abréviation

APS	Atmospheric Plasma Spraying
HVOF	High Velocity Oxyfuel Flame
CIAM	Construction de l'Interface Affine par Morceaux
CL	Condition aux Limites
EF	Elément Finis
TVD	Total Variation Diminishing
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluide)
MSU	Monotone Streamline Upwind Approach
SUPG	Stream line Upwind/Petro-Galerkin
COLG	Approche Colloquée De Galerkin
2D	Deux Dimensions

References bibliographiques

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

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

[3] M. K. Fataoui "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique. Modèle mécano thermique de l'étalement de la gouttelette". Thèse de doctorat, Université de Limoge

[4] Y. MEBDOUA (2008)" Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du Dépôt " Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[5] 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 doctorat, Université de Limoges, 1995.

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

[7] Dussoubs B. (1998)"Modélisation tridimensionnelle du procédé de projection plasma :influence des conditions de la poudre et des paramètres de projection sur le traitement et la répartition des particules dans l'écoulement", Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[8] GIRARD Laurence Caractérisation Expérimentale d'une Torche De Découpe dans L'oxygène : étude de jet de plasma et de l'interaction arc-matériau ; Université Paul Sabatier, Toulouse III pp 5-6.

[9] M. P. Planche Contribution à l'étude des fluctuations dans une torche à plasma. Application à la dynamique de l'arc et aux mesures de vitesses d'écoulement. Thèse de Doctorat d'Université, Limoges, Université de Limoges, 1995, 140 p.

[10] R. Etchart-Salas Projection par plasma d'arc de particules submicroniques en suspension. Approche expérimentale et analytique des phénomènes impliqués dans la reproductibilité et la qualité des dépôts. These de Doctorat d'Université, Limoges, université de Limoges, 2007, 230 p.

[11] Pfender Electric arcs and arc gas heaters In Gaseous electronics, (Ed.) M. N. Hirsch & H. J. Oskam, Academic New York, 1, 1978, p.291.

[12] E. Pfender Generation and properties of non equilibrium plasmas. In International Summer School on Plasma Chemistry, (Ed.) E. Pfender, University of Minesota, USA,1987, p. 65.

[13] M.P. PLANCHE, **J.F. COUDERT**, and **P. FAUCHAIS**. Velocity measurements for arc jets produces by a dc plasma spray torch. Plasma Chem. Plasma Process, 18 :263–286, 1998.

[14] FAUCHAIS and **A. VARDELLE**. Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying. Int. J. Therm. Sci., 39 :852–870, 2000.

[15] E. Pfender, plasma jet behavior and modeling associated with the plasma spray procss, Thin Solid Films, 238 (2), 1994, pp228-241.

[16] E. Pfender, **J.R. Fincke, R. Spores,** Entrainment of could gas into thermal plasma jets, Plasma Chem. & Plasma Process, 1 (4), 1991, pp 529-543.

[17] O. Lagnoux, **A Denoirjean**, **L**. **Bianchi**, **M.F**. **Elchinger**, **P**. **Fauchais**, Enthalpy probe measurement : Interaction between plasma jets and entrained atmosphere , in Progress in Plasma Processing of Materials,(ed.)P. Fauchais, (pub.) Begell House, USA, 1999, pp339-346

[18] B. Pateryron, **G**. **Delluc**, **M.F. Elchinger**, **P. Fauchais,** Study of behavior of the heat conductivity and transport properties of a single reacting system: H2-air and H2-air. Dilution effect in spraying process at atmospheric pressure, J High Temp. Chem.Processes,1 (3), 1992, pp 325-332.

[19] R. SPORES and E**. PFENDER**. Flow structure of a turbulent thermal plasma jet. Surf. Coat. Tech., 37 :251–270, 1989.

[20] V. Debout Contribution à l'étude des propriétés optiques de dépôts plasma de zircone yttriée: Influence de leurs caractéristiques microstructurales et physico-chimiques. Thèse de Doctorat d'Université, Limoges, Université de Limoges, 2007, 306 p.

[21] S. Janisson Etude des jets de plasma et du traitement des particules en projection plasma avec

mélanges ternaires de gaz en atmosphère et température contrôlées. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 1999.
[22] M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender Thermal Plasma: Fundamental and Applications. Plenum Press, New York, 1, 1994, 452 p.
[23] P. Fauchais, A. Vardelle Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying. International Journal of Thermal Science, 39, 2000, pp. 852-870.
[24] Z. Duan, L. Beall, J. Schein, J. Heberlein, M. Stachowicz Diagnostics and Modelling of an Argon/Helium Plasma Spray Process. Journal of Thermal Spray Technology, 9, (2), 1999, pp.225-234.
[25] M. P. Planche, J. F. Coudert, P. Fauchais Velocity Measurements for Arc Jets Produced by a DC Plasma Spray Torch. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 18,1998, pp.263-283.
[26] D. Sacriste, N. Goubot, An Evaluation of the Electric Arc Spray and (HPPS) Processes for the Manufacturing of High Power Plasma Spraying MCrAlY Coatings, Thermal Spray Technology, Vol.10 (No.2), 2001, pp352-358
[27] T. Vais, E. Rajamaki, Effect of the Nozzle Design and Atomization Gas on the Properties of the Electric Arc Sprayed Ni18Cr6Al2Mn-Coating: Tagungsband Conference Proceeding, (Ed.) E. Lugscheider, P.A. Kammer, (Pub.) DVS Deutsher Verband fur Schweiben, Germany, (1999), pp550-552
[28] TAHAR Souâd, « Influence de la température de jet sur l'empilement des couches pendant la construction d'un dépôt par projection thermique », Université de Médéa
[29] 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 », Thèse de Doctorat d'Université, Limoges
[30] Y.M. Yang, C. Coddet and M. Imbert, Numerical modeling and simulation of particule behaviours in an HVOF supersonic flow. Proc. of the 15th Int. Thermal Spray Conf. 25-29 May 1998, Nice, France.
[31] S. Sampath, X. Y. Jiang, J. Matejicek, A. C. Leger, A. Vardelle Substrate Temperature Effects on Splat Formation, Microstructure Development and Properties of Plasma Sprayed Coatings. Part I: Case Study for Partially Stabilized Zirconia. Materials Science and Engineering A, 272, 1999, pp.181-188.
[32] C. Mundo, M. Sommerfeld, C. Tropea Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process. International Journal of Multiphase Flow, 21 (2), 1995, pp.151-173.
[33] E. Nogues-Delbos Densification de dépôts de zircone yttriée projetés par plasma d'arc Ar-H2 et N2-H2 pour leur utilisation dans l'industrie des semi-conducteurs. Thèse de Doctorat d'Université, Université de Limoges, 2007, 218 p.
[34] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron, P. Fauchais Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation. Proceedings of th 2004 International Thermal Spray Conference, Osaka, Japon, 10-12 mai 2004, (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD-ROM, 6p.
[35] A. Vardelle, C. Moreau, P. Fauchais, Deposit formation dynamics, MRS Bulletin, 2000, July, pp 32-37.
[36] 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
[37] C. Escure, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Visualization of the impact of drops on substrate in plasma spraying: Deposition and splashing mode, in Thermal Spray 2001: New surfaces for new millennium, (ed.) C. C. Brendt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp 805-812.
[38] M. Vardelle, A. Vardelle, A. C. Leger, P Fauchais, D. Gobin, Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes, J. Thermal Spray Technology, 4 (1), 1994, pp 50-58.
[39] S. Sampath, X.Y. Jiang, J. Matejicek, A.C. Leger, A. Vardelle, Substrate temperature effects on splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings Part I: Case study for partially stabilized zirconia, Material Science and Engineering A, 272, 1999, pp 181-188.

[40] C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, Influence of Substrate preparation on the flattening and cooling of plasma-sprayed particles, J. Thermal Spray Technology, 4 (1), 1995, pp 25-33.
[41] E. W. Collings, A. J. Markworth, J. K. McCoy, J. H. Saunders, Splat-quench solidification of freely falling liquid-metal drops by impact on a planar substrate, J. Material Science, 25, 1990, pp 3677-3682.
[42] M. Fukumoto, E. Nishioka, T. Matsubara, Effect of interface wetting on flattening of freely fallen metal droplet onto flat substrate surface, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research, (ed.) C.C. Brendt, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2000, pp 759-765.
[43] J. Madjeski Solidification of Droplets on a Cold Surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp.1009-1013.
[44] S. Chandra, P. Fauchai Formation of solid splats during thermal spray deposition. Journal of Thermal Spray Technology, 18 (2), 2009, pp. 148-180.
[45] M. Vardelle, A. Vardelle, A. C. Léger, P. Fauchais, D. Gobin Influence of Particle Parameters at Impact on Splat Formation and Solidification in Plasma Spraying Processes. Journal of Thermal Spray Technology, 4 (1), 1995, pp.50-58.
[46] D. Bernard, P. Fauchais Influence of the Torch-Substrate Relative Movements and Cooling of the Coatings during Spraying on the Mechanical Properties of TBCs. Thermal Spray Research and Applications, (Ed.) F. Bernecki, (Pub.) ASM International, pp.551-560.
[47] C. J. Li, Y. He, A. Ohmori Characterization of Structure of Thermally Sprayed Coating. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Nice, France, 25-29 Mai 1998, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM international, Ohio, USA, pp.717-722.
[48] A. J. Allen, J. Ilavsky, G. G. Long, J. S. Wallace, C. C. Berndt, H. Herman Microstructural Characterization of Yttria Stabilized Zirconia Plasma-Sprayed Deposits using Multiple Small-Angle Neutron Scattering. Acta Materialia, 49, 2001, pp.1661-1675.
[49] G. Antou, G. Montavon, F. Hlawska, A. Cornet, C. Coddet Exploring Thermal Spray Grey Alumina Coating Pore Network Architecture by Combining Stereological Protocols and Impedance Electrochemical Spectroscopy. Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, Seattle, USA, (Ed.) B.R. Marple, M.M. Hyland et al., (Pub.) ASM International, Ohio, USA, CD Rom, 7 p.
[50] F. Rogers, Benefits and Technology Developed to Arc Spray 3/16 inch Diameter Wires Used for Corrosion Protection of Steel: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp691-698.
[51] 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
[52] 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.
[53] M. Mellali, Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma, thèse de l'Université de limoges, 1994.
[54] N. A. Hussary, J. Heberlein, Investigation of arc Behavior and Particle Formation in the Wire Arc Spray Process Using High Speed Photography: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp737-742.
[55] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, J.C. Labbe, P. Fauchais, Influence of Substrate surface Oxidation Stage on the Morphology and Flattening of Splats, Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Plasma Processes, July 2002, Strasbourg, France, Begel house.
[56] X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Shrouded CO2 Atomization 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),pp31-37.
[57] G. Espié, P. Fauchais, Study of the in-Flight Oxidation of Iron Particles during the APSEffect of Dissolved Oxygen on the Wetting onto Ceramic Substrates, Advanced Materials and Processes, Ed. 99, 1999, pp423-429

[58] Gilles Espié, Oxydation de particules de fer dans un plasma d'arc Ar-H2, influence sur les propriétés du dépôt, Thèse de doctorat, Procèdes Céramiques et Traitements de Surface, Université de Limoges, 2000, pp8-11 et pp80-84
[59] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, B. Hannoyer, J.C. Labbe, P. Fauchais, Oxidation at Different Stages in Stainless Steel Coatings Developed by Air Plasma Spraying on Plain Carbon Steel, Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Spray, July 2002, Strasbourg, France, Begel House.
[60] H. Zhang, G. Espié, Oxidation and Evaporation of Iron Droplet in a Plasma Jet, ISPC 14, Prague, Ed. Hr bovsky, Vol. 5, August 1999, pp2775-2784
[61] M.F.Smith, R.C. Dykhuizen, Oxidation in HVOF-Sprayed Steel, Thermal Spray: a United Forum for Scientific and Technological Advances, (Ed.) C.C Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1997), pp885-893.
[62] A. Vardelle, P. Fauchais, N.J. Themelis, Oxidation of Metal Droplets in Plasma Sprays: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C. Coddet and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp175-180.
[63] A. Harir, Contribution a la faisabilité de dépôts composites métal-lubrifiant solide élabores par plasma d'arc, Thèse de l'Université de Limoges, 2002
[64] H. Llewellyn, P.S. Grant, A.P. Newbery, R.M. Jordan, Development of an Electric Arc Sprayed Self Lubricating Coating: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet,(Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp263-268
[65] 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
[66] Y. Tanaka, M. Fukumoto, Investigation of Dominating Factors on Flattening Behavior of Plasma Sprayed Ceramic Particles, Surface and Coatings Technology, 120-121, 1999, pp124-130
[67] G. Jandin, H. Liao, Z.Q. Feng, C. Coddet, Correlations Between Operating Condition, Microstructure and Mechanical Properties of Twin Wire Arc Sprayed Steel Coating, Materials Science Engineering, A00 , 2002, pp1-8
[68] 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, pp4667-4677
[69] H.L. de Villiers Lovelock, Power/ Processing/ Structure Relationships in WC-CO Thermal Spray Coatings: a Review of the Published Literature, Thermal Spray Technology, Vol. 7 (No.3), 1998, pp357-373
[70] C.K. Lin, C.C. Bendt, Measurement and Analysis of Adhesion Strength for Thermally Sprayed Coating, Thermal Spray Technology, Vol. 3 (No.1), 1994, pp75-104
[71] J. Comy, Treatment and Analysis of Adhesive Bonding, Thermal Spray Technology, Vol. 10 (No.3), 1990, pp161-165
[72] X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich, Effect of Nozzle Configuration Gas Pressure and Gas Type on Coating Properties in Wire Arc Spray, Thermal Spray Technology, Vol. 8 (No.4), 1999, pp565-575
[73] P Charles Howes, Processing, Preparation, Coating and Applications, Welding, 73, 1991, pp47-51
[74] S. Amada, H. Yamada, Introduction of Fractal Dimension to Adhesive Strength Evaluation of Plasma Sprayed Coating, Surface and Coating of Technology, 78, 1993, pp50-55
[75] M.P. Planche, R. Bolot, C. Coddet, In-Flight Characteristics of Plasma Spraye Alumina Particles: Measurements, Modeling, and Comparison, Thermal Spray Technology, Vol. 12 (No.1), 2003, pp101-111
[76] P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, L. Bianchi, A.C. Leger, Parameters Controlling the Generation and Properties of Plasma Sprayed Zirconia Coating, Plasma Chem. Plasma Proc., Vol. 16 (No.1), 1996, pp99-126
[77] S. Tobe, A Review on Protection From Corrosion, Oxidation and Hot Corrosion by Thermal Spray Coatings: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp3-

[78] R.C. Tucker, An Overview of Alternative Coatings for Wear and Corrosiopn Resistance: Meeting the Challenges of the 21st Century, (Ed.) C. Coddet, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1998), pp103-107
[79] J. Ilavky, J. Pisacka, P. Chraska, N. Margandant, S. Siegmann, W.Wagner, P. Fiala, G. Barbezat, Microstructure-Wear and Corrosion Relationships for Thermally Sprayed Metallic Deposits: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp449-454
[80] T. Tajiri, Z. Zeng, Microstructure and Corrosion Behavior of Arc Sprayed Stainless Steel Coating: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp697-703
[81] M.R. Dorfman, J.A. Debarro, Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C. Coddet and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp567-572
[82] T. Suzuki, K. Ishikawa, Y. Kitamura, Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp1033-1038
[83] S. Simard, B. Arsenault, Influence of Thermal Spray Process on the Corrosion Behavior of High-Density 316 Stainless Steel Coatings in Simulated Marine Environment: Advancing the Science and Applying the Technology, (Ed.) B.R. Marple, C. Moreau, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2003), pp323-327
[84] 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
[85] Site Internet de Gordon England: www.gordonengland.co.uk
[86] 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.
[87] F. Ben ettouil(2008)" Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc" thèse de doctorat à Université de Limoges.
[88] H. Makhlouf (2008) "Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers" thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
[89] 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.
[90] 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.
[91] V.R.Voller.(1990)Fast implicit finite difference method for the analysis of phase change problems.IMA Journal of Numerical Analysis ,30:875-898.
[92] M.Rappaz,M.Bellet ,and **M.Deville**.(2003) Numerical Modeling in Materials science and Engineering. Springer series in Computational Mathematics,Springer-verlag edition.
[93] 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.
[94] 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.
[95] B .J. Daly. A technique for incuding surface tension eects in hydro_dynamic calculations. J. Comput. Phys, vol. 4, p. 97-117, 1969
[96] F. H. Harlow and **J. E. Welsh.**" Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow with free surface". Phys. Fluids, 8 :2182-2189, 1965.
[97] F. H. Harlow and **J. P. Shannon**. " The splash of a liquid drop". J. Appl. Phys, 38 (10) :3855 3866, 1967.
[98] S. Vincent. Modélisation d'écoulements incompressibles de fluides non-miscibles. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1999.
[99] http://thetis.enscbp.fr/sites/default/files/theses/these_j_breil.pdf.; 2012
[100] V.V .Sobolev, Formation of splat morphology during thermal spraying. Materials Letters, vol. 36, p, 123-127, 1998.

[101] 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.
[102] 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.
[103] 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.
[104] O. Pironneau: "Méthodes des éléments finis pour les fluides", Masson (1988).
[105] Manual of Ansys ver 11, Ansys.inc, USA.
[106] J. Madejski, Solidification of droplets on a cold surface, Int. J. Heat and Mass Transfer, 19, 1976, pp 1009- 1013.
[107] M.Pasandideh-Fard,s.D.Aziz,S.chandra,javad .Mostaghimi numerical simulation of thermal spray coating formation ,in proceeding of the 1 st international thermal spray conference ,Montreal ,Quebec,may 8-11.
[108] Pershin, I. Thomson, S. Chandra, J. Mostaghimi, Splashing of nickel droplets during plasma spraying, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research.
[109] R.C. Dykhyizen, Review of impact and solidification of molten thermal spray droplets, J. Thermal Spray Technology, 3 (4), 1994, pp 351-61.
[110] P. Chraska, J. Dunsky, K. Neufuss, J. Pisacka, Alumina-based plasma-sprayed materials part I: Phase stability of alumina and alumina-chromia, J. Thermal Spray Technology, 6 (3), 1997, pp 320-326.