REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MÉDÉA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

EN GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE

Thème

L'état de fusion des particules lors l'impact simultané et/ou successif sur un substrat oxydé en présence des aspérités et sous l'action d'un champ magnétique

présenté par :

-Amara Mohamed Seddik

-ZaouiRabeh

Proposé et dirigé par :

-Dr. ZIRARI Mounir

Année universitaire: 2019-2020

Remerciment

Tout d’abord on prie à Allah, le tout puissant qui nous a donné la santé et la volonté pour arriver à ce stade.

Nos vifs remercîments vont à tous qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail, spécialement pour :

Nos promoteurs : Monsieur M.ZIRARI pour son aide, ces conseils et ses encouragements et leurs aides morales et leurs orientations.

S’eux qui ont consacrés beaucoup de temps pour notre réussite.

Mes sincères remercîments vont également à tous les membres de jury, qui font l’honneur de jurer notre travail.

Nous voudrions exprimer notre gratitude à tout le personnel de l'université

Dr. YAHIA FARES de Médéa, en particulier au corps administratif et les enseignants du département de génie mécanique.

Enfin nous tenons à adresser nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont offert un soutien et une aide dans ce travail.

Dédicace

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

grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mon cher frère ilyes

A mes chères sœurs ikram et hamida

A toute ma famille.

A tous mes profs qui nous a appris.

A mes chers amis
mohamed,aissa,charaf,noureddin,ouafi,djillali,bachir, ...

A toutes la promo Master génie mécanique 2020

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

Amara Mohamed Seddik

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

Résumé……i

Sommaire…….....iii

Liste Des Figures.…….vii

Liste Des Tables.……ix

Nomenclature……..x

Introduction générale……..1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

I.1.Introduction ……4

I.2.Projection thermique……...4

I.3.principe générale de projection thermique ……...4

I.4.organigrammme de la projection thermique 5

I.5.technique de la projection thermique …….....6

I.5.1. La projection par la flamme ……...……..6

I.5.1.1.Projection flamme poudre…….....7

I.5.1.2 .La projection flamme-fil ……..……8

I.5.1.3 .La projection supersonique par combustion ……..….9

- Le procédé HVOF…….9
- Le procédé HVAF…….9

I.5.1.4.Canon à détonation……..…..9

I.5.2.Projection par arc électrique…….10

I.5.2.1 La projection arc-fil…….....10

I.5.2.2 La projection par plasma d'arc soufflé……....11

I.5.3.La Projection plasma…….....11

I.5.3.1principe de la projection plasma …….12

I.5.3.2 Fonctionnement de la torche à plasma d'arc …….....12

- Torche à arc transféré…….....12
- Torche à arc soufflé ……13

I.5.3.2.1. Amorçage de l'arc……..14

I.5.3.2.2 .Le gaz plasmagène ……..14

I.5.3.2.3. L'injection des gaz plasmagènes ……16

I.5.3.4. Formation du jet plasma……..…….…17

I.5.3.5.Aventage et l'inconvénient du plasma ……17

I.6. Dépôt plasma ……...……18

I.7.Construction d'un dépôt … ……..……18

I.8.Qualité d'un dépôt ……20

I.9.les application de la projection thermique …….. ……..21

I.9.1.les revêtements contre l'usure ……..22

I.9.2.protection contre la chaleur ……...22

I.9.3.protection contre la corrosion ……....22

I.9.4.revétement à propriétés électrique ……23

I.9.5.revétement pour réparation et la mise en forme ……23

I.10.les types d'oxydation ……..23

a.oxydation des substrats ……23

b.oxydation des particules en vol ……....24

c. oxydation des dépôts en croissances ……...25

I.11.Adherence d'une lamelle provenant de l'étalement d'une particule fondue sur un substrat ……..26

I.11.1.adherence métallique……..26

I.11.2.adherence chimique ……..26

I.11.3.adherence mécanique ……26

I.12. les étapes de l'impact selon la nature de substrat ……..26

a. Impact sur film liquide profond……....26

b. Impact sur film liquide fin ……..…..27

c. Impact sur substrat sec ……...…..27

I.12. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat…….....29

I.12.1.Phénomènes en jeu à l'impact sur le substrat…… ……..…….....29

I.12.2.Etalement de la particule……...……...30

I.12.3.La Solidification des lamelles ……....32

I.13.L'état de l'art…….....32

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1.introduction …….41

II.2. Écoulements bi phasiques……...41

II.2.1.Modélisation bi phasique liquide/solide……41

II.3 .model dynamique ……....42

II.3.1. Modélisation de l'écoulement des fluides……...42

II.3.1.1. L'équation de la continuité ……..42

II.3.1.2. L'équation de quantité de mouvement ……43

II.3.1.3. Équation de l'énergie ……..43

II.4. Modèle thermique ……..43

II.4.1. Transfert de chaleur avec changement de phase……..……43

II.4.1.1. Méthode à grille mobile……..…..44

II.4.1.2. Méthode à grille fixe……..…....44

II.4.1.2.a. Méthode d'enthalpie…….....45

II.4.1.2.b. Méthode de la chaleur spécifique équivalente…….....46

II.4.2. Modèle thermique utilisé……..46

II.5.Calcul d'interfaces ……..46

II.5.1La méthode lagrangienne……...…..47

II.5.2 .La méthode eulérienne…….....47

II.5.2.1. Les méthodes de suivi de front ……..……..48

II.5.2.2. Les méthodes de suivi de volume …….…….48

II.5.3.la méthode VOF ……..49

II.6. Conclusion…….....52

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

Introduction…….....…….....…….…..…54

III.1. méthodes de discrétisation :…….....……54

III.1.1 Les trois grandes familles de méthodes ……..……54

III.1.1.1 Méthode des différences finies …….....……55

III.1.1.2. Méthode des volumes finis …….....…..……..……..…….55

III.1.1.3.Méthode des éléments finis …….....…….……..…..56

III.1.1.3.1 .Démarche éléments finis…….....……56

III.1.1.3.2. Présentation de la méthode…… …….....…57

III.2. Résolution des équations par éléments finis…….....…..……....….57

III.2.1IntroductionMéthodes des éléments finis….....……....….57

III.2.2. Mise en œuvre de la méthode des éléments finis……...…..……58

III. 2.2.1Formulation variation elle forte…….....…58

III.2.2.2. Formulation variation elle faible……..…….....……58

III.3. Forme généralisée des équations du système……...……..…….59

III.4.choix d'un maillage……...……..…….60

III.4 .1.discrétisation…….....…..61

III.4.2. Terme temporelle……...……..…….61

III.4.3. Terme advection……..……..…...63

III.4.3.1.Monotone Streamline Upwind Approach (MSU).....63

III.4.3.2. Méthode SUPG (Stream line Upwind/Petro-Galerkin).....65

III.4.3.3 Approche Colloquée De Galerkin (COLG)…….…….....65

III.4.4. Terme de Diffusion…….…….....…..66

III.4.5. Termes source…….……..……..66

III.5.Forme discrétisée 67

III. Conclusion …….....…68

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV.2.Introduction…….70

IV.3.Présentation du code de calcul ANSYS……..70

IV.3.1.Schéma de logiciel ANSYS……...……71

IV **-4.**Matériaux utilisés …….…….……...72

1. L’aluminium…….72

IV-5. Identification……..…….…….74

IV-6. Oxydation de la surface des substrats métalliques …….……..……..76

- Résistance thermique de contact additionnelle…….…….76

IV-6.1.Configuration et conditions d’étalement avec une couche d'oxydation ……..77

IV-7.Rugosité du substrat …….……...…….78

IV-8.Description du domaine d’application……...…….79

IV-8.1.Premier expérience : la taille des pics……..…….79

IV-8.1.1.Conclusion partielle ……..……..84

IV-8.2 les essai 85

IV-8.2 .1 la première essai 85

IV-8.2.1.1.Conclusion partielle 88

IV-8.2 .2 la deuxième essai 89

IV-8.2 .3 la troisième essai 92

IV-8.2 .4 la quatrième essai 95

IV-8.3..Conclusion partielle 99

Les références

[1] : la projection thermique AVRIL - JUIN 2007http://www.surfatec.org

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

[4]:http://www.tcpp.fr/html/projectionthermique.htm
[5] :S. Nourouzi, thèse doctorat : « Contribution à l'étude du procédé Arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive », Université de Limoges, 2004.
[6] :A. Prôner, Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur, Vol. (MD3), 1645(1999), 1-20.
[7] :bouhlaismail,saidaniaboubaker : simulation numérique de l'impact des gouttelettes creuse d'aluminium sur un surface d'acier 2014

[8] :S. Beauvais, Thèse doctorat : « Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma », Ecole de Mines de Paris, 2003
[9] : Fauchais P., Grimaud A., Vardelle A., Vardelle M., "La projection plasma revue", Ann. Phys. Fr., Vol.14, pp. 261-310, (1989).
[10]:C. BAUDRY. Thèse doctorat : « Contribution à la modélisation instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma », Université de Limoges, 2003
[11]: P. Fauchais, Understanding plasma spraying, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, p 86-108, (2004)
[12] : M. Khalid FATAOUI : Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique. Modèle mécano thermique de l'étalement de la gouttelette l'Université CHOUAIB DOUKKALI le 2007.
[13] :N. Venkatramani, Industrialplasmatorche and application, Currentsciences, 83(3),p 254-262, (2002).
[14] :M. Fadhel BEN ETTOUIL : Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc 2008.
[15]:S. A. Wutzke, E. Pfender, E. R. G. Eckert, Study of electric arc behaviour with superimposed flow, IAAA Journal, 5 (4), p 707-713-, (1967)
[16] :

[17] :BIANCHI L. Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôt céramiques : mécanisme de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts. Thèse de doctorat d'université. Université de Limoges, 1995, 197 p.

[18] : MELLALI M. Influence de la rugosité et de la température du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma. Thèse de doctorat d'université. Université de Limoges, 1994, 292 p.

[19] : VerdyC.,"Structures multicouches misesen forme par projection thermique:élaboration, caractérisation et applications",Thèse de doctorat, Institut Polytechnique deSévenans,1998.

[20] : Moreau C., Cielo P., LamontagneM.,"Flattening and solidification ofthermallysprayedparticles", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 1, No. 4, 1992, pp. 317-323.

[21] : Power Tribology, Laboratory international research and developement in moleculartribology, Belgique, 2012.

[22] :Kudinov V., Pekshev P., Belaschenko B., Solonenko O.,Safiulin V., ”Obtention desrevêtements par plasma”,en russe, Moscou, “Nauka”, 1990, p 401

[23] : TL. PawlowskiT«HTDépôts physiques: techniques, microstructures et propriétés TH» presse polytechniques et universitaire romandes, T2003.

[24] : TC. Janot, J. Dubois T«HTLesquasicristaux: Matière à paradoxesT»T TH TEDP science 1998.

[25] :TB. Normand, N. Pébère, B. Balland, M. Wery, Caroline Richard, Collectif, T«HTPrévention et lutte contre la corrosion: Une approche scientifique et techniqueT»T. TH Tpresse polytechniques et universitaire romandeTT 2004.

[26] : Syed AsifAnsar Co-projection d’alumine ET d’acierinoxydable par plasma d’arc, University of New York at Stony Brook, USA, 2004

[27]: Chandra S, Fauchais P, Formation of solid splats during thermal spray deposition, Journal of thermal spray technology, (2009), volume 18, issue 2, pp 148-180

[28]: Bahbou MF, Nylen P, On line Measurement of Plasma-Sprayed Ni-Particles during Impact on a Ti-Surface : Influence of Surface Oxidation, Journal of thermal spray technology, (2007), volume 16, issue 4, pp 506-511

[29]: Souâd TAHAR: Influence de la temperature de jet surl’empilement des couches pendant la construction d’un depot par projection thermique ,2012.

[30]: Abd el Kader DEBBAZI , Mohamed Amine DEHIM**:** Influence de la distance inter-particules lors de l’impact sur l’interaction dynamique et thermique de formation de lamelle,2017.

[31] :Ya-Zhe Xing1 • Ke Wang1 • Li He1 • Zhang Liu1 • Yong-Nan Chen1: «Investigation of the Bonding Formation of a Plasma-Sprayed Cast Iron Splat on a Preheated Aluminum Substrate Using an Experimentally Based Numerical Simulation Method» J Therm Spray Tech ,Submitted: 23 December 2019 / in revised form: 20 March 2020

[32] Y.Z. Zheng, Q. Li ∗, Z.H. Zheng, J.F. Zhu, P.L. Cao : «Modeling the impact, flattening and solidification of a molten droplet on a solid substrate during plasma spraying» School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China, 5 August 2014

[33]]Khalid FATAOUI, Bernard PATEYRON, Mohammed El GANAOUI, Modèle d'impact de gouttes chaudes sur un substrat solide froid, congrès Français de Thermique, Toulouse 3-6 juin 2008.

[34] R.G. Castro, A.H. Bartlett, K.J. Hollis, and R.D. Fields, The Effect of Substrate Temperature on the thermal diffusivity and Bonding Characteristics of Plasma Sprayed Beryllium, Fusion Eng. Des., 1997, 37, p 243-252

[35] J.-J. Tian, S.-W. Yao, X.-T. Luo, C.-X. Li, and C.-J. Li, An Effective Approach for Creating Metallurgical Self-bonding in Plasma-Spraying of NiCr-Mo Coating by Designing Shell–Core– Structured Powders, Acta Mater., 2016, 110, p 19-30

[36] S. Brossard, P.R. Munroe, A.T. Tran, and M.M. Hyland, Study of the Splat Microstructure and the Effects of Substrate Heating on the Splat Formation for Ni-Cr Particles Plasma Sprayed onto Stainless Steel Substrates, J. Therm. Spray Technol., 2010, 19, p 1100-1114

[37] C.-J. Li, C.-X. Li, and G.-J. Yang, Examination of Substrate Surface Melting-Induced Splashing During Splat Formation in Plasma Spraying, J. Therm. Spray Technol., 2006, 15, p 717-724

[38] M. Bussmann, J. Mostaghimi, S. Chandra, Phys. Fluids 11 (1999) 1406

[39] M. ZIRARI S.TAHAR, N. BACHA, Numerical analysis of the dynamics and the rapid solidification on splat formation during thermal spray process using the finite element method, 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013

[40] R. Ghafouri-Azar, S. Shakeri, S. Chandra, J. Mostaghimi, Interactions between molten metal droplets impinging on a solid surface,Centre for Advanced Coating Technologies, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Available online 2 December 2002.

[41] H. Guo, J. Hu, and H. L. Tsai , modalisation numérique de la formation au soudage a froid et amélioration du GMAW d'alliages d'aluminium, Numerical Heat Transfer, Part A, 57: 392–414, 2010

[42] Soufiane OUKACH, Bernard PATEYRON, Mohammed ELGANAOUI et Hassan HAMDI,Simulation numérique d'une particule d'alumine fondue s'écrasant sur un substrat froid.

[43] L. Li, X.Y. Wang, G. Wei, A. Vaidya, H. Zhang, and S. Sampath, Substrate Melting During Thermal Spray Splat Quenching, Thin Solid Films, 2004, 468, p 113-119

[44] G.X. Wang, R. Goswami, S. Sampath, and V. Prasad, Understanding the Heat Transfer and Solidification of Plasma-Sprayed Yttria-Partially Stabilized Zirconia Coatings, Mater. Manuf. Process., 2004, 19, p 259-272

[45] Vinh Nguyen Duy ,, Truong V. Vu , A numerical study of a liquid drop solidifying on a vertical cold wall, c School of Transportation Engineering, Hanoi University of Science and Technology, 1 Dai Co Viet, Hai Ba Trung, Hanoi, Viet Nam,au 20 August 2018

[46] L.C. Mayo, S.W. McCue, T.J. Moroney, W.A. Forster, D.M. Kempthorne, J.A. Belward, I.W. Turner, Simulating droplet motion on virtual leaf surfaces, Roy. Soc. Open Sci. 2 (2015) 140528.

[47] Z. Jin, X. Cheng, Z. Yang, Experimental investigation of the successive freezing processes of water droplets on an ice surface, Int. J. Heat Mass Transfer 107 (2017) 906–915.

[48] G.A. Satunkin, Determination of growth angles, wetting angles, interfacial tensions and capillary constant values of melts, J. Cryst. Growth 255 (2003) 170–189

[49] S.M. Tilehboni, E. Fattahi, H.H. Afrouzi, M. Farhadi, Numerical simulation of droplet detachment from solid walls under gravity force using lattice Boltzmann method, J. Mol. Liq. 212 (2015) 544–556.

[50] Mingguang Shena , Ben Q. Li b,∗ , Yu Bai, Numerical modeling of YSZ droplet impact/spreading with solidification microstructure formation in plasma spraying, China, Available online 6 January 2020

[51] S. Oukach, H. Hamdi, M.E. Ganaoui, B. Pateyron, Numerical study of the spreading and solidification of a molten particle impacting onto a rigid substrate under plasma spraying conditions, Therm. Sci. 19 (1) (2015) 277–284.

[52] Truong V. Vu , Cuong T. Nguyen , Quan H. Luu , Numerical study of a liquid drop on an inclined surface with solidification, Viet Nam, Available online 30 August 2019

[53] V.V. Sobolev and J.M. Guilemany, Effect of Oxidation on Droplet Flattening and Splat-Substrate Interaction in Thermal Spraying , Journal of Thermal Spray Technology Volume 8(4) December 1999-523.

[54] Minxia Xue Yoav, Heichal Sanjeev, Chandra,Javad Mostaghimi , Modeling the impact of a molten metal droplet on a solid surface using variable interfacial thermal contact resistance, Published online: 11 November 2006 Springer Science+Business Media, LLC 2006.

[55] Sanjeev Chandra et Pierre Fauchais, Formation of Solid Splats During Thermal Spray Deposition, Journal of Thermal Spray Technology, June 2009, Volume 18(2).

[56] J. Ortega-Casanova, F.J. Granados-Ortiz, Simulation numérique de transfert de chaleur à partir d'une plaque chauffée avec la variation de surface à un jet d'impact ,International Journal of Heat and Mass Transfer (2014),Journal home page: www.elsevier.com/locate/ijhmt

[57] S. Alavi M. Passandideh-Fard J. Mostaghimi,Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer Including Phase Change during the Impact of Semi-Molten Particles , Summer Heat Transfer Conference 2012 July.

[58] 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

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

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

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

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

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

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

[65] 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.

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

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

[68] 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.

[69] 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[79] 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.
[80] D.Vincent (2007) «Contribution à l'Etude des Propriétés Optiques de Dépôts Plasma de Zircone Yttriée : Influences de leurs Caractéristiques Microstructurales et Physico-chimiques » Thèse de doctorat, Université de Limoges. 2007
[81] Patru(2005) «Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircone et d'Acier» Thèse de doctorat, Université de Limoges. 2005

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

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

[84]-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.

[85]- P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, L. Bianchi, A.C. Leger, Parameters controlling the generation and properties of plasma sprayed zirconia coatings, Plasma Chem. Plasma Process., 16 (1), 1996, pp 119S-125S.

[86] -Kriba Ilhem Rafika, Etude numérique de l'écrasement de particules fondues sur des substrats métalliques Application au procédé de projection thermique, thèse de doctorat en Physique des matériaux, université de Batna,2010.

[87]-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.
[88]-pershin ,I.Thomson ,S.chandra,J.mostaghimi,splashing of nickel droplets during plasma spraying, in thermal spray :surface engineering via applied research.
[89]-R.C.Dykhyizen,review of impact and solidification of molten thermal spray droplets ,J.thermal spray technology,3(4),1994,pp351-61.
[90]-P.Chraska ,J.Dunsky,K.neufuss,J.Pisacka,thermal spray technology,6(3),1997,pp320-626

Figure I.1 : Schéma de principe de la projection thermique 4
Figure I-2 : Principe de la projection thermique 5
Figure I-3 : schéma de principe de la projection thermique 6
Figure I.4 : Projection à la flamme 7
Figure I-5 : Schéma de principe d'un pistolet flamme 8
Figure I-6: Schéma d'un pistolet flamme fil 8
Figure I.7 : Schéma du procédé HVOV 9
Figure I.8 : Schéma de fonctionnement du canon à détonation 10
Figure I-9 : schéma du procédé arc fil 11
Figure I.10:schéma de principe de la projection par d'arc soufflé 11
Figure I.11 : Principe de fonctionnement de projection plasma 12
Figure I-12:Torche plasma à arc transféré 13
Figure I-13 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma 13
Figure I-14:Torche plasma(a) à arc transféré(b)à arc soufflé 14
Figure I-15 : Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes 15
Figure I-16 : Viscosité en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes 15
Figure I-17: Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes 16
Figure I.18:Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche De projection plasma 17
Figure I.19:Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface 18
Figure I.20: Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique 19
Figure I.21: Résultats des interactions des particules avec le substrat 20
Figure I.22: Paramètres influençant la qualité d'un dépôt plasma 21
Figure I.23 : Impact sur film liquide fin 27
Figure I.24 : Les différents types d'impacts en fonction de la valeur du paramètre K 29
Figure I.25: modes d'impact 30
Figure I.26:schéma d'écrasement des particules 31
Figure II.1 : Répartition des phases pour trois problèmes bi phasiques 40
Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température 46
Figure II.3 : Présentation des méthodes de calcul d'interface 47
Figure II.4: Différentes méthodes de suivi de front 49
Figure II.5 : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque 49
Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret 50
Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique 51
Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps 52
Figure III 1 : méthode de discrétisations 54
Figure III-2 :(a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique 60
Figure III .3 :l'approche de ligne de courant d'Upwind 62
Figure III 4 : bilan thermique 66
Figure IV-1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS 71
Figure IV-2 : configuration géométrique et conditions d'étalement pour l'identification 73
Figure IV-3 : impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement 74

Figure IV-4: comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions 75
Figure IV-5: Schéma représentant le contact lamelle/substrat après l'oxydation de la Surface 76
Figure IV-6 : Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation 76
Figure IV-7: Représentation d'une surface au profil sinusoïdal idéal .Pour des faibles amplitudes 77
Figure IV-8 : Représentation de Rz sur un profil de surface 77
Figure IV-A.1:configuration géométrique l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C avec d=0. 2mm et d=0. 4mm 78
Figure IV-A.2:configuration géométrique de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92mm de diamètre sur un substrat de 200°C avec d=0.2mm 78
Figure IV-A.3 : la variation de pression d'impact à l'interface Particule / substrat, pour D=0. 2mm 79
Figure IV-A.4 : la variation de pression d'impact à l'interface Particule / particule, pour D=0. 2mm 79
Figure V-A.5 : profiles de température en fonction de temps pour quatre positions Au long de substrats verticalement pour D=0. 2mm 79
Figure IV-A.6 : profile de température séquentielle dans le temps pour D=0.2mm 79
Figure IV-A.7 : profile de pression séquentielle dans le temps pour D=0.2mm 79
Figure IV-A.8 : la variation de pression d'impact à l'interface Particule / substrat, pour D=0. 4mm 79
Figure IV-A.9: la variation de pression d'impact à l'interface Particule / particule, pour D=0. 4mm 80
Figure IV-A.10 : profiles de température en fonction de temps pour quatre positions Au long de substrats verticalement pour D=0. 4mm 80
Figure IV-A.11 : profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (-500) 87

Figure IV-A.12 : profile de température séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (-500) 87

Figure IV-A.13 : profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (500) 90

Figure IV-A.14 : profile de température séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (500) 90

Figure IV-A.15 : profile de température séquentielle aux pics dans le temps

Pour l'essai (500) 91

Figure IV-A.16 : profile de température séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (1000) 93

Figure IV-A.17 : profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (1000) 93

Figure IV-A.18 : profile de température séquentielle aux pics dans le temps

Pour l'essai (1000) 94

Figure IV-A.19 : profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (850) 96

Figure IV-A.20 : de temperature séquentielle au long du substrat dans le temps

Pour l'essai (850) 96

Figure IV-A.21 : profile de température séquentielle aux pics dans le temps

Pour l'essai (850) 97

Figure IV-A.22 : variation de la temperature dans point d'impact pour les touts essai 98

Figure IV-A.23 : comparaison entre les facteurs d'étalement de trois essais 98

Liste des tableaux :

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

Tableau IV-1 : Les prospérités des mâtereaux utilisés 72

Tableau IV-2 : Propriétés physiques de Fe_2O_3 utilisé dans les calculs 76

Tableau IV-3 : L'influence de La topographie du substrat sur l'étalement des gouttes des deux cas. 80

Tableau IV- 4 : les résultats de l'étalement des goute de la premier expérience 82

Tableau IV-5 les résultats de l'étalement des goute de la premier expérience 86

Tableau IV-6 les résultats de l'étalement des goute de la deuxièmes expérience 89

Tableau IV-7 les résultats de l'étalement des goute de la deuxièmes expérience 92

Tableau IV-8 . les résultats de l'étalement des goute de la deuxièmes expérience 95

Résumé

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètresexpérimentaux, relatifs

Principalement a la nature du matériau a projeter, la source de chaleur , l'atmosphère environnante,

Le substrat .les interaction entre phase solides et liquide et entre gouttes qui s'écrasentsimultanément sur la surface solide l'une a cote de l'autre ou bien l'une après l'autre posent question ,parce qu'elles modifient la morphologie d'impact évalue pour une goutte isolée. L'observation et l'interprétationexpérimentale des phénomènes difficiles a contrôler et a maitriser ,se compliquent encore lorsque l'impact est est relatif a plusieurs gouttes simultanées de même la formation d'une couche dépendétroitement du temps entre deux impacts successifs.

Apres l'impact d'une goutte sur le substrat , lamelle résultante subit un refroidissement très rapides (quelques microsecondes).à une température inférieur a sa température de fusion. Ce refroidissement est suivi d'un réchauffage périodique du a l'arrives des particules suivantes .cette « chaleur d'impact

Diminue rapidement quand la lamelle est recouverte par une autre , en particulier lorsque le matériau ,les constituant , a une mauvaise conductivité thermique

Afin de mieux comprendre le phénomène d'impact de gouttes multiples ,nous proposant l' étude numérique préliminaire d'un cas types de l'impact simultané et/ou successif sur un substrat oxydé présentant des aspérité et sous l'action d'un champ magnétique

Mot clés :

Champ magnétique , VOF, éléments finis, impact, successive, simultané, topographie, oxydation, Lamelle ,dépôt ,substrat ,changement e phase ,chaleur spécifique .

Summary

The morphology and properties of the deposits depend on many experimental, relative parameters
Mainly to the nature of the material to be projected, the heat source, the surrounding atmosphere,
The substrate. The interaction between solid and liquid phase and between drops which crash simultaneously on the solid surface one beside the other or one after the other raise questions, because they modify the morphology impact rates for an isolated drop. The observation and experimental interpretation of phenomena that are difficult to control and master, are further complicated when the impact is relative to several simultaneous drops, so the formation of a layer depends closely on the time between two successive impacts.
After the impact of a drop on the substrate, the resulting coverslip undergoes very rapid cooling (a few microseconds) .to a temperature below its melting temperature. This cooling is followed by periodic heating due to the arrival of the following particles. This "impact heat"
Decreases rapidly when the coverslip is covered by another, especially when the material constituting them has poor thermal conductivity
In order to better understand the phenomenon of impact of multiple drops, we propose the preliminary numerical study of a typical case of the simultaneous and / or successive impact on an oxidized substrate with roughness and under the action of a field. magnetic
Keywords:

Magnetic field, VOF, finite elements, impact, successive, simultaneous, topography, oxidation, Lamella, deposit, substrate, phase change, specific heat

الملخص

تعتمدمورفولوجياوخصائصالرواسبعلىالعديدمنالمعلومات التجريبية المتعلقة بشكل أساسي بطبيعة المادة المراد رشها, مصدر الحرارة المحيطة. واحد بجانب الاخر او الواحد تلو الاخر يثير الأسئلة لأنهم يعدلون مورفولوجيا التأثيرالتي تم تقييمها من اجل انخفاض معزول.

ان المراقبة والتفسير التجريبي للظواهر التي يصعب السيطرة عليها والتحكم بها تكون اكثر تعقيدا عندما يكون التأثير نسبيا للعديد من القطرات المتزامنة, لذلك يعتمد تكوين الطبقة بشكل وثيق على الوقت بين تأثيرين متتاليين, بعد تأثير الهبوط على الركيزة, تخضع الصفيحة الناتجة للتبريد السريع جدا (بضع ميكروثانية) الى درجة حرارة اقل من درجة حرارة الانصهار. ويتبع هذا التبريد إعادة التسخين الدوري لوصول الجسيمات الباقية,حيث تنخفض "حرارة الصدمة" هذه بسرعة عندما يغطي الغطاء ساتلي المكونات, ويكون التوصيل الحراري ضعيفا من جانب اخر, خاصة عندما تكون المادة من اجل فهم الظاهرة بشكل افضل تأثير قطرات متعددة تقدم لنا

دراسة رقمية أولية لحالة نموذجية للتأثير المتزامن او المتتالي على ركيزة الاكسيد مع خشونة او تحت تاثير المجال المغناطيسي

الكلمات الرئيسية.

العناصرالمحدودة.التأثير, متتالية,سومولتان, تضاريس, اكسدة, المجال المغناطيسي, ترسب ,لاميلا, الركيزة ,تغير حرارة المرحلة المحددة.

Dans le domaine des revêtements et traitements de surface, pris au sens large, les notions de surface et d'interface ont un rôle majeur, En fonction de leurs caractéristique, ces deux notions conditionnent les propriétés fonctionnelles d'une pièce en services : résistance à la fissuration, à la corrosion, à la fatigue mécanique au choc thermique, à l'usure et au frottement, dureté, aspect extérieur. La science des surfaces a connu un important essor au cours de ces dernières décennies. Bien que conscient, depuis longtemps, des différences entre les propriétés surfaciques et volumiques, ce n'est que depuis peu de temps qu'elles sont réellement prises en compte de mises à profit. Le développement de nouvelles méthodes de caractérisation, qui sont devenues de plus en plus sensibles et performantes, a permis de faire d'énormes progrès sur la connaissance des surfaces, notamment, en permettant d'établir des relations entre les caractéristiques d'une surface et le propriétés d'emploi (adhésion tribologie, fatigue de contact, corrosion …).

Apparue, dès le début du siècle dernier, la projection thermique a joué un rôle très important dans l'évolution de la science des surfaces depuis près de 100 ans. Cette technique consiste à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide qui est fondu par l'intermédiaire d'un pistolet ou d'un chalumeau adéquat. Elle peut, en réalité, être considérée comme un système très complexe ou de nombreux paramètres interviennent et interagissent.

Jusque dans les années 1920, la projection thermique (appelée successivement shoopage de nom de son inventeur le Docteur Shoop puis métallisation) avait essentiellement des applications pour la protection contre la corrosion et pour la décoration. Son utilisation s'est développée, après la seconde guerre mondiale suite aux pénuries de métaux et de pièces de rechanges. Les industriels de l'époque ont utilisé la projection thermique pour restaurer les côtes initiales de pièces mécanique usées. Au cours des années qui ont suivi, le champ d'application de la projection thermique s'est de plus diversifié, avec entre autres, l'apparition du canon à détonation (fin des années 1950) qui a permis des avancées dans le domaine de l'usure et du frottement et avec celle des premiers systèmes de projection à la troche plasma (dans les années 1960) qui ont été très utilisés dans l'industrie aéronautique.

Les revêtements permettent ainsi d'allonger la durée de vie utile de la pièce, d'augmenter son efficacité et/ou de réduire les coûts de maintenance/réparation (par exemple dans l'aviation, l'automobile, la marine, la génération d'électricité, etc…). La technique de projection thermique peut également être utilisée pour donner une seconde vie à des pièces usées. Finalement, les revêtements peuvent être appliqués de façon manuelle (incluant sur site) ou bien en usine de façon robotisée.

Les revêtements par projection thermique sont appliqués à un substrat pour donner à une surface spécifqu'une qualité qu'elle n'a pas à l'origine. Ainsi, la résistance apparente d'une pièce est garantie par le substrat, et le revêtement offre des qualités de surface supérieures telles que la résistance à la corrosion, à l'usure ou à la chaleur. La technique des revêtements par projection thermique est largement exploitée dans l'industrie aérospatiale et l'industrie de production d'énergie électrique pour

les sections neuves et résinées ainsi que pour les pièces des moteurs d'avion et des turbines à gaz, des compresseurs et des pompes. Les propriétés de certains revêtements ne peuvent être "fabriquées" que par projection thermique, en utilisant principalement les métaux, céramiques, carbures et composites ainsi que les mélanges de divers matériaux.

La projection thermique (ou à « pulvérisation thermique ») est une technologie permettant d'appliquer à bas couts et dans le respect de l'environnement des revêtements aux propriétés très variées. Les matériaux déposés sont principalement des métaux, des céramiques, des polymères & des composites avec pour objectif de protéger le substrat contre divers phénomènes tels que la corrosion, l'attaque chimique, l'abrasion, l'usure et le transfert de chaleur.

Le développement actuel de la projection thermique est dû essentiellement aux industries de point (aéronautique et automobile, biomédicale, microélectronique..). Il est, d'ailleurs, de plus difficile de trouver un secteur industriels ou l'on n'a pas recours à l'utilisation de ce procédé. Citions par exemple le cas de l'industrie informatique qui utilisé de plus en plus fréquemment des implants revêtus de titane et/ou d'hydrox apatite, dont l'organigramme illustre une explication exhaustive.

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

Notre travail est présenté en quatre chapitres :

- Le premier chapitre consiste en un rappel bibliographique sur la projection thermique est ces différents types, la projection plasma ainsi que l'impact, l'étalement et la solidification des particules sur le substrat.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié.
- Le troisième chapitre est dédié à la résolution numérique et les méthodes de calcul.
- Dans le dernier chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation numérique avec leurs interprétations en se basant sur l'étude de la formation d'une lamelle après l'impact simultané a la présence de champ magnétique obtenus par l'ANSYS APDL.

I.1 : Introduction

Les projections thermiques sont des procédés particuliers de dépôt caractérisés par une injection de particules solides dans un gaz ou mélange de gaz à haute température où elles sont chauffées, accélérées et projetées sur le substrat à revêtir. Plusieurs types de projections thermiques sont actuellement utilisés.

En présenter dans ce chapitre la définition avec les techniques principales et les applications de la projection thermique, ainsi que les types d'impact selon la nature du substrat.

I .2 .La projection thermique

La projection thermique fait partie des techniques de traitements de surfaces par voie sèche. Elle regroupe plusieurs procédés qui ont tous en commun de fondre un matériau d'apport puis de le projeter sous forme de gouttelettes grâce à un gaz vecteur. En principe, tous les matériaux dont la température de fusion est séparée d'au moins 300 °C de leur température de décomposition ou de vaporisation, peuvent être projetés. Le dépôt est formé par un empilement successif de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux, ce qui conduit à une structure lamellaire. L'adhérence du revêtement est obtenue essentiellement par un phénomène mécanique et la surface des pièces est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et favoriser l'accrochage [1].

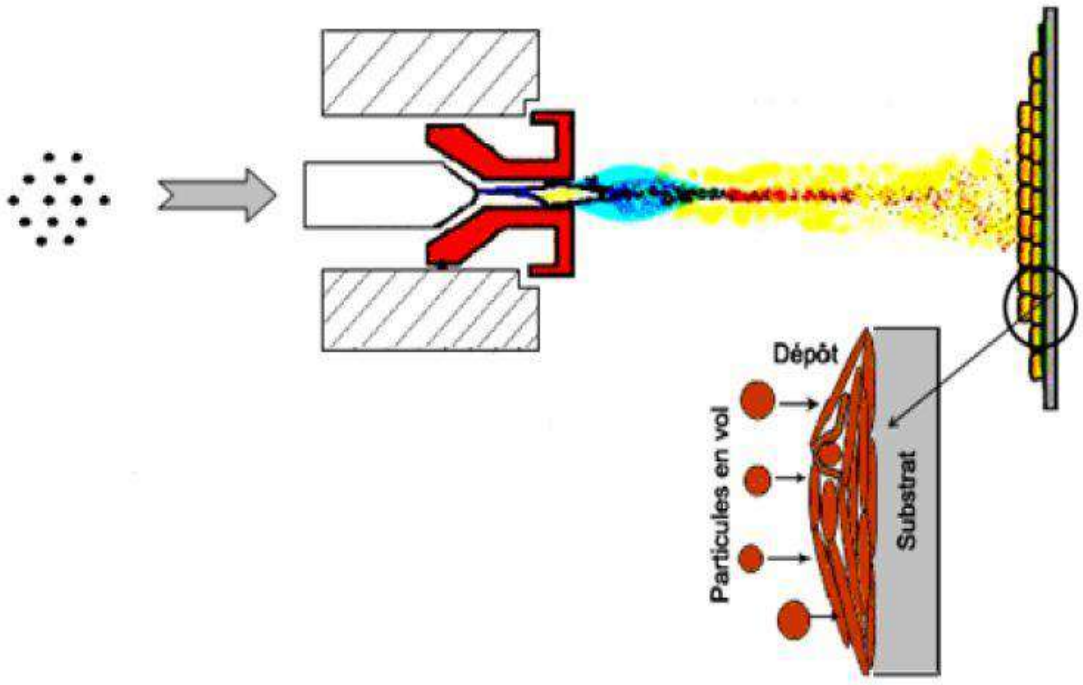


Figure I-1 : *Schéma de principe de la projection thermique.*

I.3: principe général

La technique de projection thermique consiste en l'introduction de particules dans un flux de gaz énergétique pour être fondues ou portées à l'état plastique et accélérées vers un substrat sur le quel elles s'écrasent et se solidifient sous forme des lamelles. L'empilement des particules écrasées sur le substrat constitue alors le revêtement qui présente une structure irrégulière pouvant contenir des oxydes, des porosités et des fissures.

Suivant le procédé de projection thermique, deux paramètres peuvent caractériser le système. Le premier est l'énergie thermique, le second est l'énergie cinétique [2].La figure (I.2) présente alors les caractéristiques typiques des différents procédés de projection thermique.

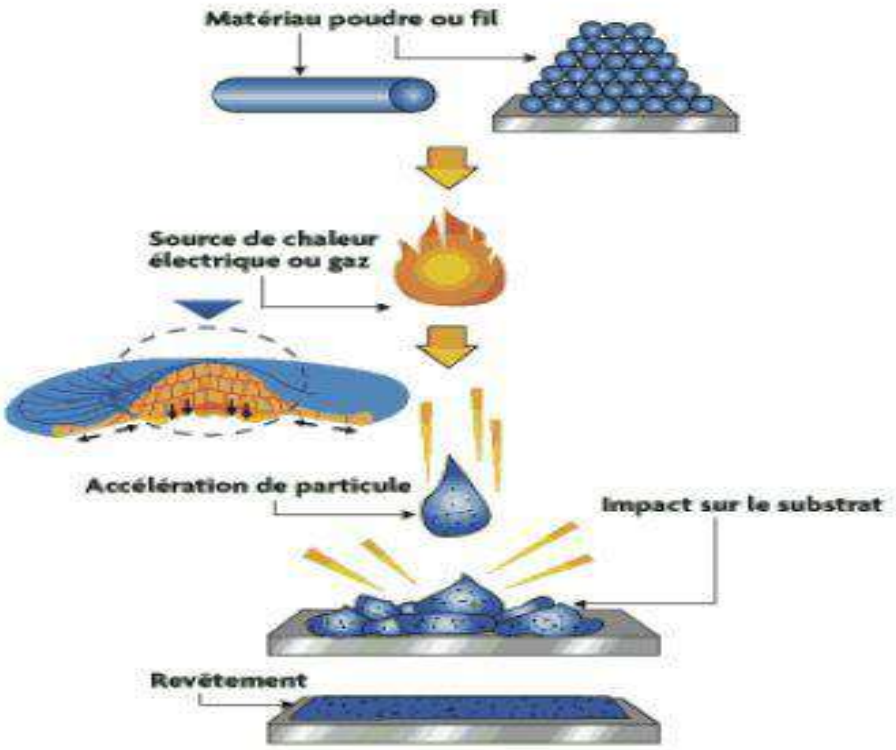


Figure I-2 : *Principe de la projection thermique.*

I.4 : Organigramme de la projection thermique :

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

Les matériaux à projeter sont généralement sous forme de poudre, de fil ou de baguette et sont soumis à une source de chaleur. Les procédés de fabrication de revêtement sont variés et utilisent différentes

sources de chaleur : la projection flamme poudre, la projection flamme fil, l'arc électrique, la projection plasma, la projection par flamme supersonique (HVOF) et le canon à détonation.

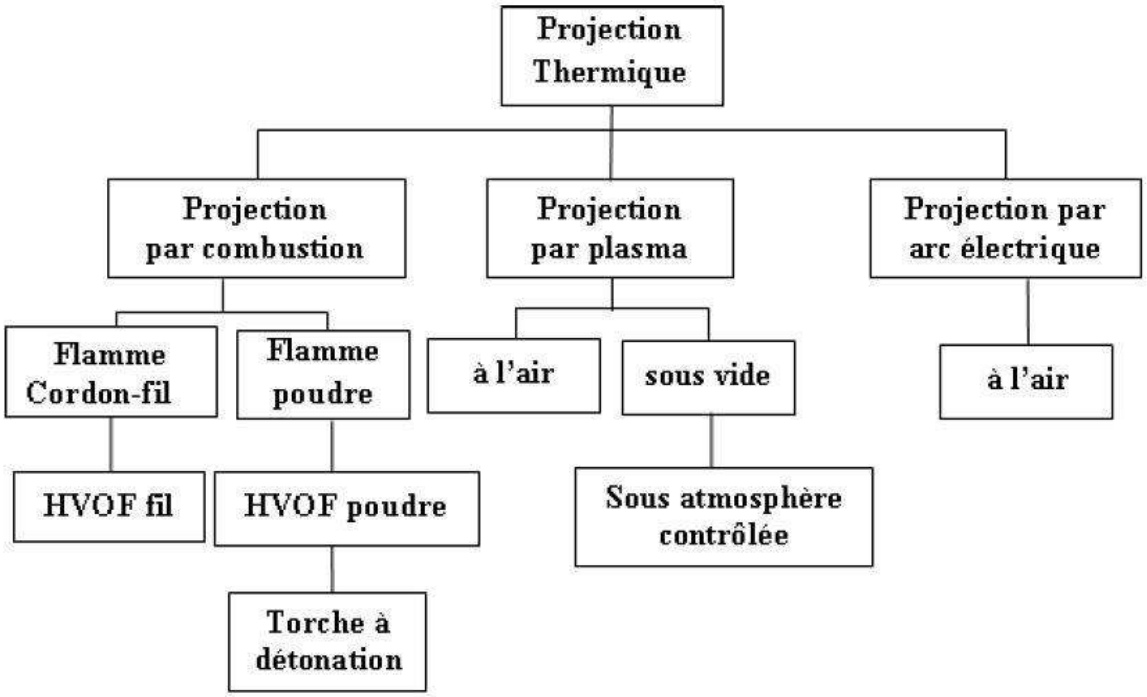


Figure I-3 : *schéma de principe de la projection thermique.*

1.5. Technique de projection thermique :

Il existe de nombreux procédés de projection thermique qui sont différenciés principalement par la source d'énergie mise en œuvre (combustion, décharge électrique).

Les trois principaux sont la projection par flamme, par arc électrique et par plasma. Le transfert thermique entre les particules projetées et le substrat étant relativement faible, la pièce revêtue ne subit, normalement, ni déformation, ni changement de structure, ni altération majeure.

I.5.1 .Projection par la flamme :

Cette technologie utilise l'énergie de la combustion d'un carburant gazeux (acétylène par exemple) avec de l'oxygène. Les températures atteintes par une flamme oxyacétylénique sont de l'ordre de 3300 K ; les matériaux dont la température de fusion est inférieure à 2573 K peuvent être projetés sous forme de poudres. Les matériaux utilisés sous forme de fil ou de tige (en général des métaux, des

alliages et certaines céramiques) peuvent être projetés si leur température de fusion est inférieure à 3173 K.

On distingue en général 3 techniques qui relèvent de cette technologie : projection par flamme, projection par flamme hypersonique et projection par canon à détonation. De plus, pour la projection par flamme, on différentie la projection dite « flamme poudre » de celle dite « flamme fil» d'après le conditionnement du matériau.

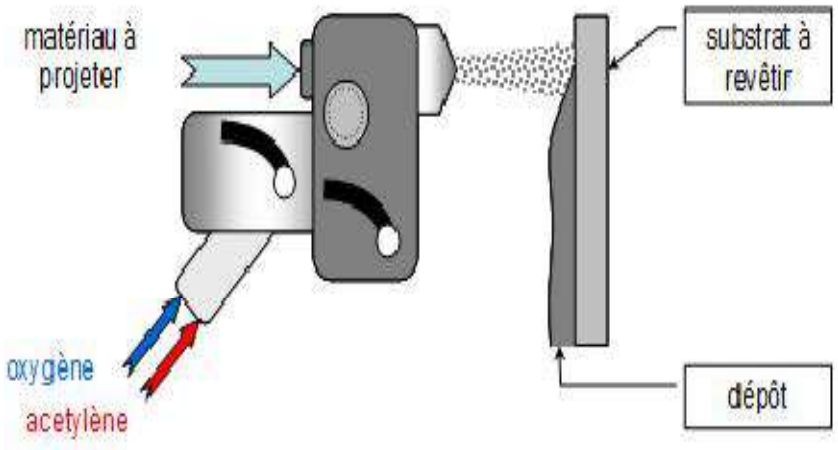
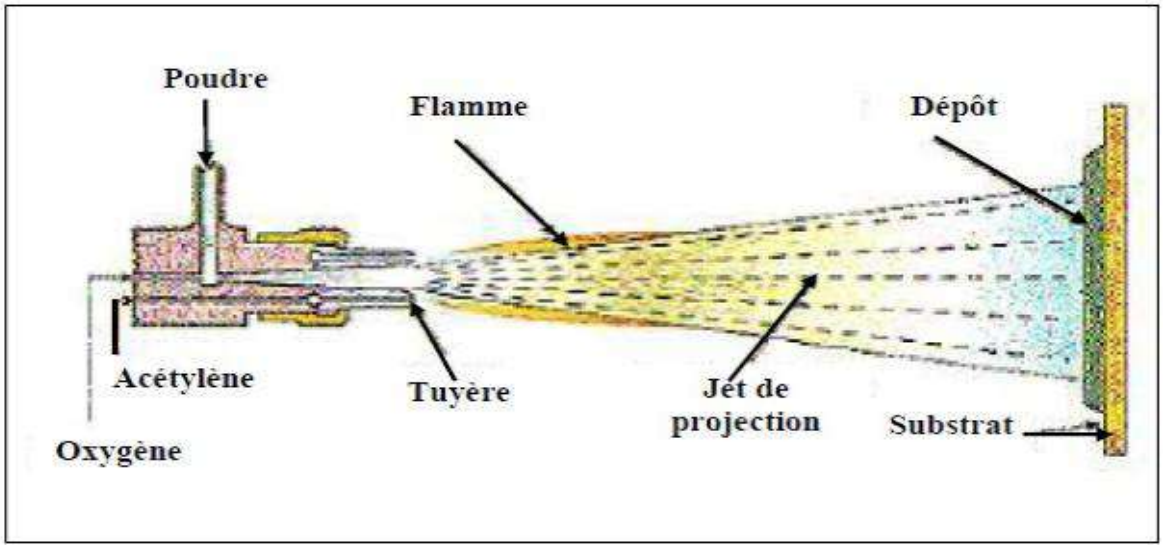


***Figure I-4** : Projection à la flamme [3].*

I.5.1.1 : La projection flamme –poudre :

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure suivante. L'utilisation de débit litres pour contrôler les débits de gaz est un facteur important. Un des principaux avantages des pistolets de projection flamme poudre par rapport au pistolet de projection flamme fil est lié à la plus grande variété de revêtements disponibles due au fait que la plupart des matériaux sont disponibles sous forme de poudres. Le procédé de projection flamme poudre est seulement limité par les matériaux qui ont une température de fusion supérieure à celle de la flamme ou alors dans le cas où le matériau projeté se décompose à la chaleur. Des revêtements de polymères (PTFE, PA12, ...) peuvent aussi être réalisés par projection flamme [4].



***FigureI-5** : Schéma de principe d'un pistolet flamme [5].*

I.5.1.2.La projection flamme-fil :

Dans cette technique (fig. I.6) le matériau est conditionné sous forme de fil ou de tige et entraîné dans la flamme par des rouleaux placés à l'arrière de la torche. Ces rouleaux sont actionnés par un moteur électrique ou un moteur pneumatique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés. [5-6] La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme (T fusion= 0,95 T flamme). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al2O3, Al2O3-TiO2, ZrO2avec stabilisants).

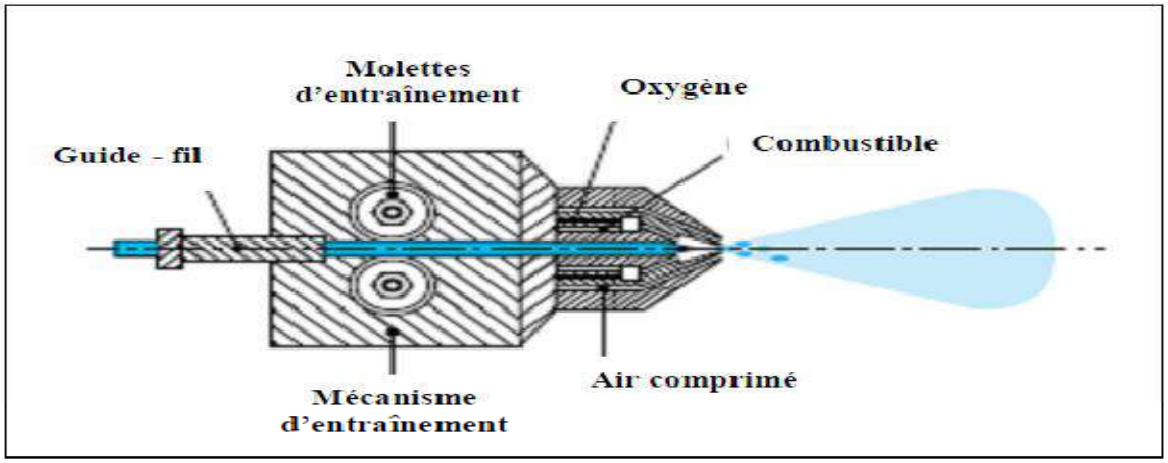


***Figure I-6**: Schéma d'un pistolet flamme fil [6].*

I.5.1.3.La projection supersonique par combustion :

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

- **le procédé HVOF** : High Vélocité Oxo-fuel Flamme, il utilise la combustion à l'oxygène d'un carburant gazeux tel que : propane, propylène, tétère, méthane ou l'hydrogène ou liquide : généralement du kérosène.
- **le procédé HVAF** : High Vélocité Air-fuel Flamme, la combustion est assurée par un mélange kérosène-air comprimé [5].

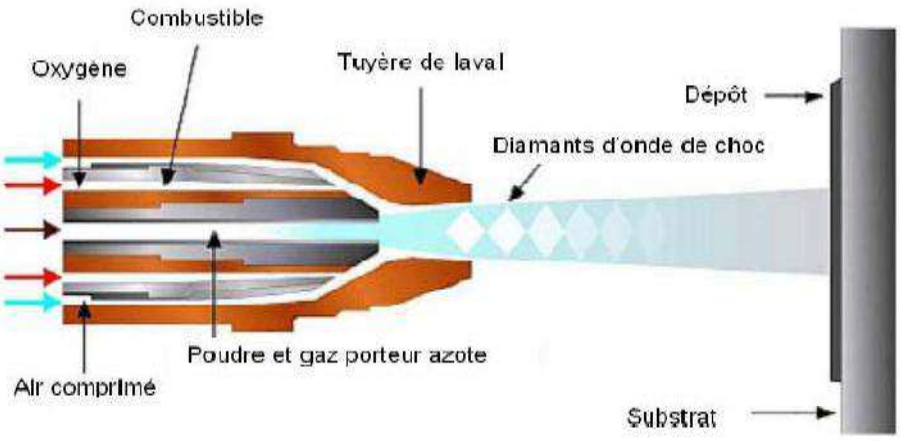


***Figure I.7** : Schéma du procédé HVOV.*

I.5.1.4.Le canon à détonation :

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

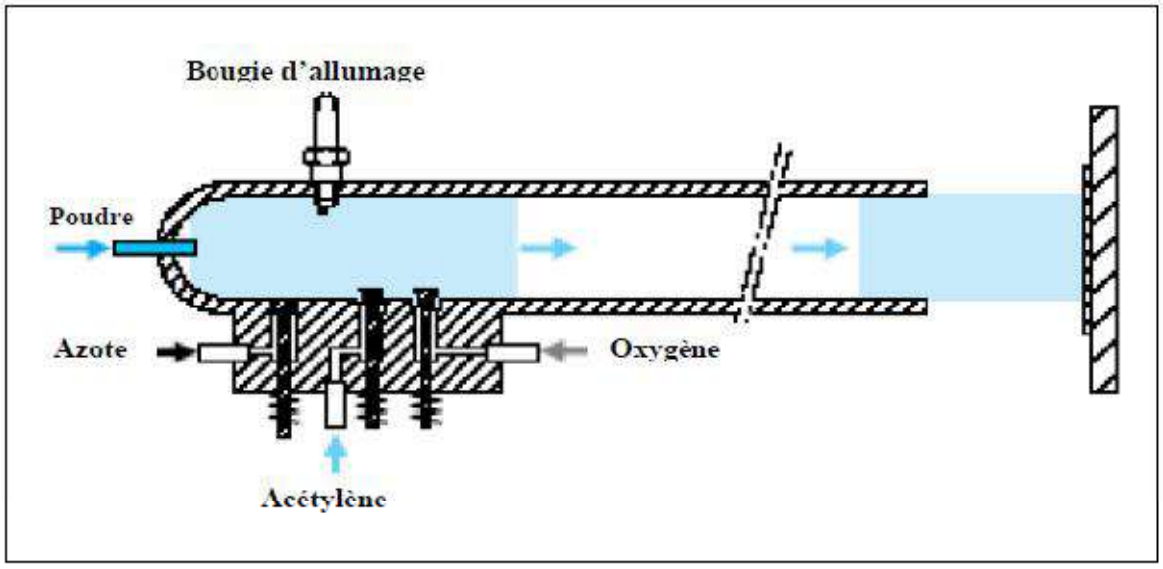


***Figure I.8**: Schéma de fonctionnement du canon à détonation.*

I.5.2 : La projection par arc électrique *:*

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, ce qui permet de fondre le matériau. Un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu et le projette sur le substrat. La température et l'énergie cinétique élevée acquise par les particules grâce au jet d'air comprimé permettent d'obtenir des dépôts avec de faibles porosités et une bonne adhérence dans des épaisseurs comprises entre 0.2 et 3 mm. Les limitations de ce procédé résident dans la nature des matériaux à projeter, qui doivent être conducteurs (essentiellement des métaux), dans la structure grossière des dépôts et dans leur taux d'oxydation relativement élevé en raison du transport des particules par de l'air comprimé. Ce procédé est très simple à mettre en œuvre, et particulièrement bien adapté aux impératifs de fiabilité et de reproductibilité imposés par la production en moyennes et grandes séries.

I.5.2.1. La projection arc-fil :

Cette technique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux électrodes sous formes de fils ductiles consommables comme source de chaleur pour fondre le matériau (fig. I.9). Celui-ci, réduit à l'état de gouttelettes, est pulvérisé sur le substrat par un jet d'air comprimé. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A Ce procédé de projection est simple et économique mais limité aux matériaux conducteurs et très filables ; le récent développement des fils fourrés céramiques tend à y remédier [5, 8].

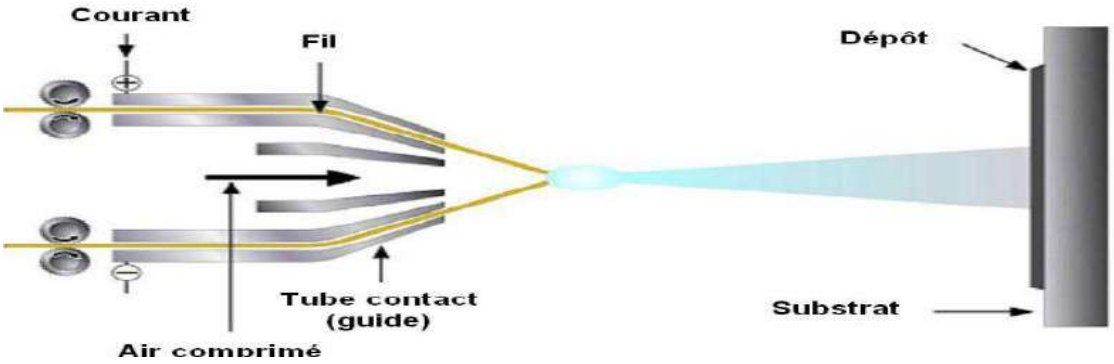


Figure I-9 : *schéma du procédé arc fil.*

I.5.2.2.La projection par plasma d'arc soufflé (APS):

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

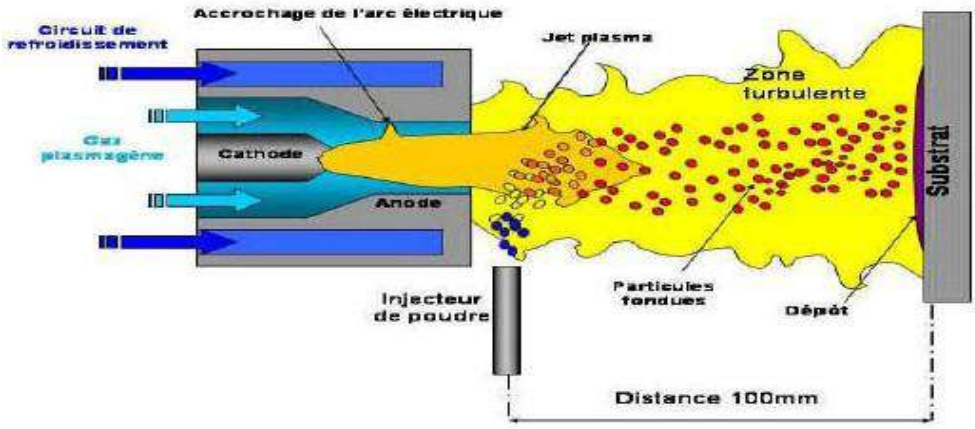


Figure I.10:*schéma de principe de la projection par d'arc soufflé.*

I.5.3 : La projection plasma

Ce procédé utilise des matériaux métalliques, céramiques ou cermets sous forme de poudre avec des particules de taille inférieure à 100 µm. Ces particules sont déposées dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. La source de chaleur est un jet de plasma produit par arc électrique ou une décharge radiofréquence [9].

I.5.3.1 : Principe de la projection plasma :

C'est cette technique qui a été utilisée pour déposer nos échantillons, elle utilise comme source thermique un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères) éclatant entre deux électrodes, dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général (fig. I.11). Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée de 1000 à 1500 m /s [10]. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur, généralement de l'argon. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat.

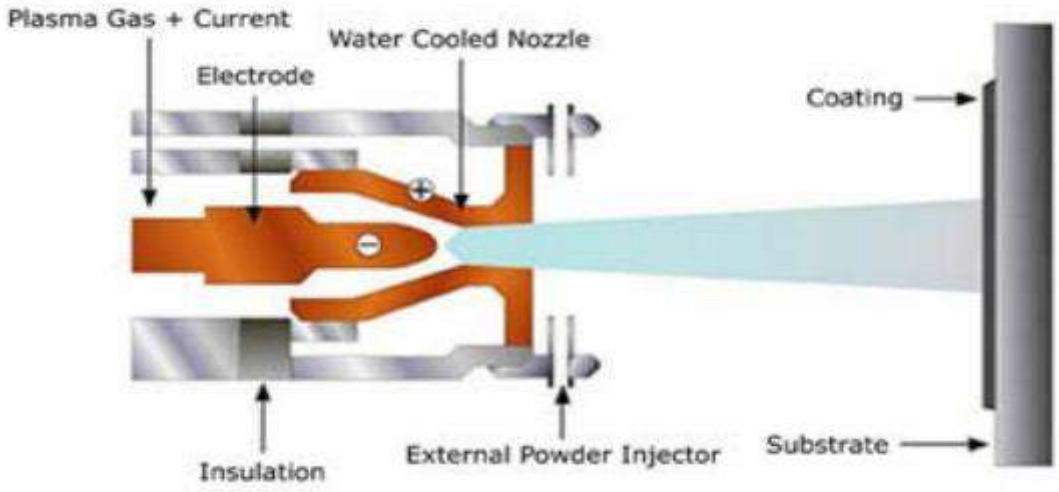


Figure I.11 : *Principe de fonctionnement de projection plasma.*

I.5.3.2 : Fonctionnement de la torche à plasma d'arc

Les torches conventionnelles employées en projection plasma sont constituées d'une cathode en forme de tige et d'une anode concentrique qui constitue la tuyère. Le gaz plasmagène circule dans l'espace entre ces deux éléments .Deux familles de torche sont à distinguer [11].

- *Torcheàarctransféré:*l'arcjaillitentreuneélectrodeinterneetuncorpsconducteur, généralement le substrat

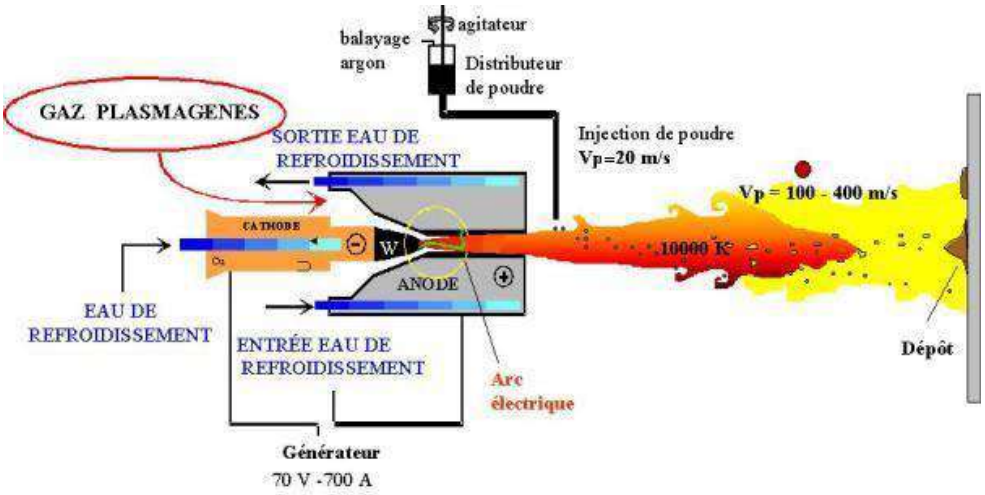


Figure I-12:*Torche plasma à arc transféré.*

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

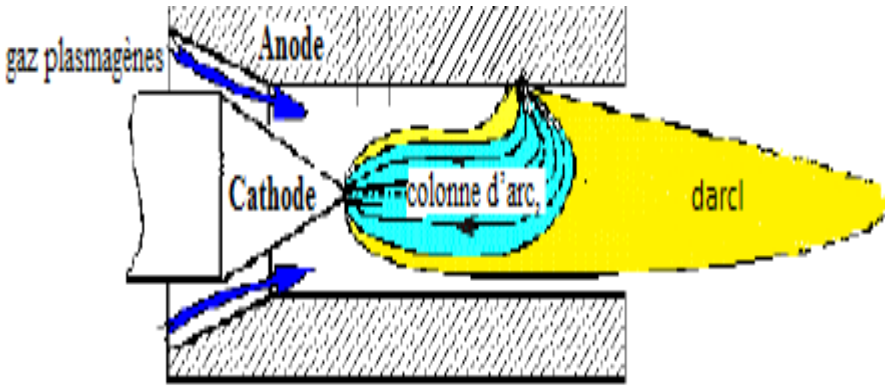


Figure I-13 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma.

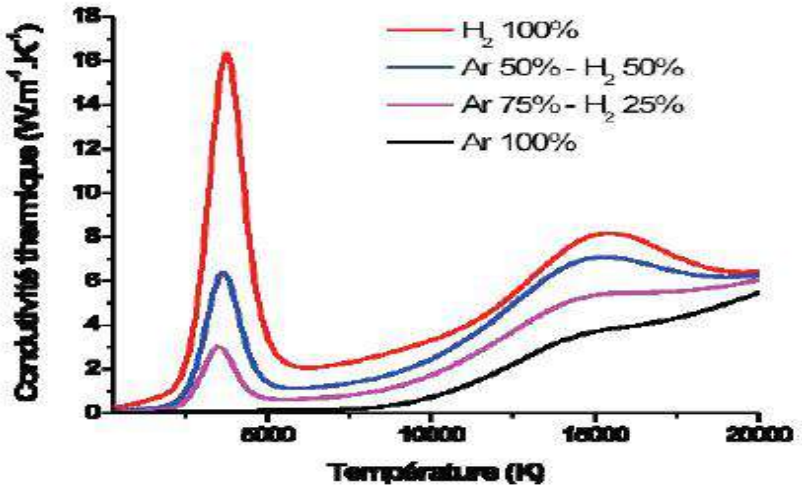


Figure I-14: *Torche plasma(a) à arc transféré à arc soufflé [11,13].*

I.5.3.2.1 : Amorçage de l'arc :

L'amorçage de l'arc est assuré par une surtension, supérieure à une tension critique appelée tension de claquage, appliquée entre les deux électrodes. La valeur de cette tension de claquage dépend de la nature du gaz plasmagène, de la pression et la distance inter-électrodes [10]. Cette surtension (6 à 10 kV) est appliquée à l'aide d'un circuit haute fréquence (plusieurs MHz) en série ou en parallèle avec l'arc et le générateur de courant. L'argon est souvent utilisé à l'amorçage car il érode peu les électrodes et qu'il s'ionise à plus faible énergie que les autres gaz plasmagènes (N 2, H 2, He).

I.5.3.2.2 : Le gaz plasmagène :

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

$\int_0^l E(Z).dz$ Où lest la longueur de la colonne d'arc. Le champ électrique dépend fortement des pertes de la colonne d'arc. Plus celles-ci augmentent plus l'arc se construite pour les limiter, accroissant par ce biais le champ électrique E. Les pertes latérales dépendent principalement d'une part du diamètre interne de la tuyère (plus il diminue plus elles augmentent, pour un courant donné) et d'autre part de la conductivité thermique du gaz plasmagène. Cette dernière est de loin la plus faible de toutes avec 'argon [14].

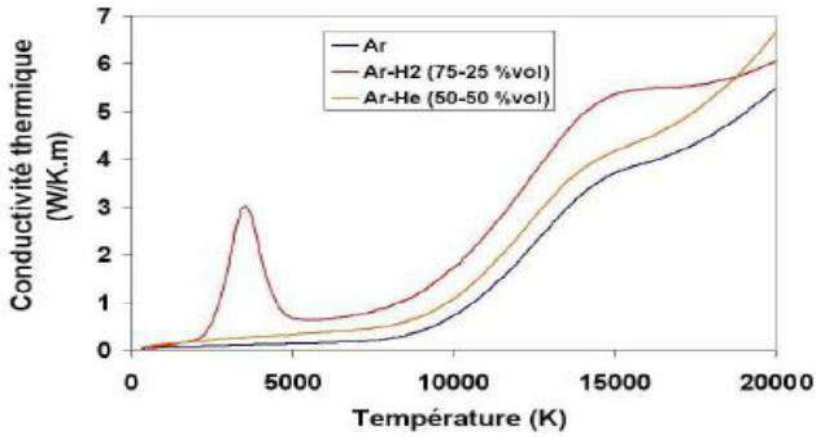


Figure I-15 : *Conductivité thermique en fonction de la température pour différents gaz plasmagènes [14].*

Pour ce dernier, cela implique des champs dans la colonne d'arc de quelques centaines de V/m limitant ainsi la tension utile à 10-15 V pour une tuyère de 6 ou 7 mm de diamètre interne. C'est pourquoi on utilise des mélanges Ar-H2 ou Ar-He, chacun ayant des avantages et des inconvénients. La tension moyenne dans l'arc est alors, suivant les conditions de fonctionnement, d'une trentaine de volts pour Ar pur, une quarantaine de volts

Pour Ar-He et une bonne soixantaine pour Ar-H2. Cependant dans ce dernier cas, le courant est limité à environ 600-650 A car la constriction au niveau pied cathodique par l'hydrogène entraîne l'usure plus rapide de la cathode au-delà de ce courant. Par contre avec l'Ar ou l'Ar-He on peut atteindre 900 A voire 1000 A. De plus l'He accroît la viscosité du mélange au-delà de 10000 K (cf. Figure I.16) ce qui permet, pour des vitesses d'écoulement proches, d'obtenir des jets de plasma un peu plus larges et un peu plus longs avec ce mélange.

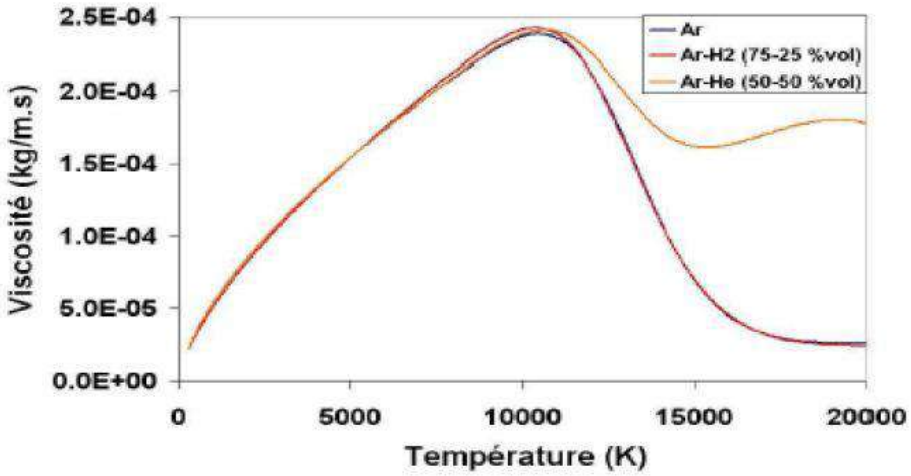


Figure I-16 : *Viscosité en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [14].*

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

Comme nous pouvons le voir sur la Figure I–11 elle est d'autant plus élevée pour une température donnée que l'on passe de l'argon pur, à l'Ar-He puis à l'Ar-H2. Mais ces courbes montrent également un point important : au-delà de 10000 K, l'augmentation du degré d'ionisation avec la température entraîne une variation importante d'enthalpie et pour accroître la température de 2000 K il faut pratiquement doubler l'enthalpie.

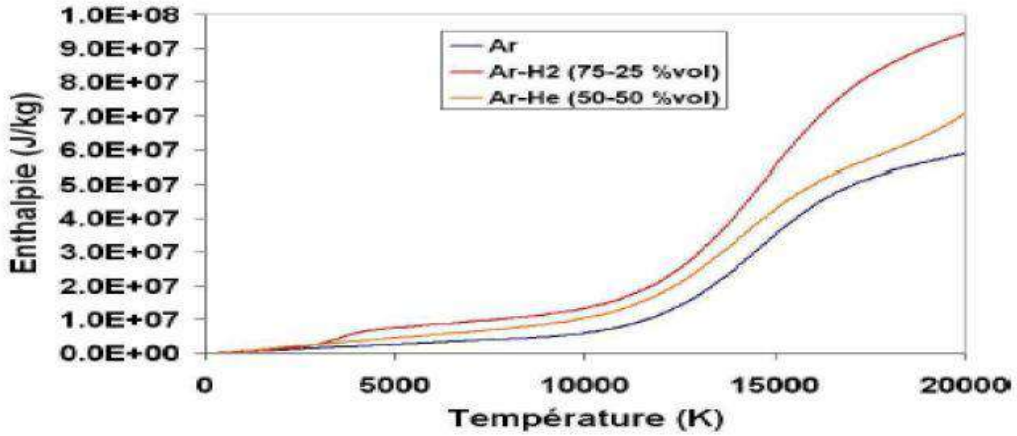


Figure I-17: Enthalpie en fonction de la température pour différents gaz Plasmagènes [14].

I.5.3.2.3 : Injection des gaz :

Le mélange gazeux est injecté dans la torche au niveau de la cathode. Trois modes d'injection du gaz dans la chambre d'arc sont possibles (Figure I.18) :

- *Injectionaxiale*:labagued'injectionestpercéedetrousparallèlesàl'axedelacathode, les gaz ont donc une composante de vitesse longitudinale;
- *Injectionradiale*:labagued'injectionestpercéedetrousorthogonauxl'axe Longitudinal de la cathode, la vitesse présente au début une composante radiale importante qui s'atténue en suite, mais beaucoup de turbulences sont générées au voisinage de la pointe de la cathode;
- *Injectionenvortex*:labagued'injectionestpercéedetrousdontl'axeprésenteuncertain angle par rapport à l'axe longitudinal de la cathode, ce qui donne une composante de rotation à la vitesse du gaz plasmagène .L'intensité du vortex est mesurée à l'aide d'une grandeur appelé «verticité» et notée «S»[6,11]qui présente le rapport de la quantité de mouvement angulaire sur la quantité de mouvement axiale. Elle est relativement faible avec ce type d'injection (S<3).

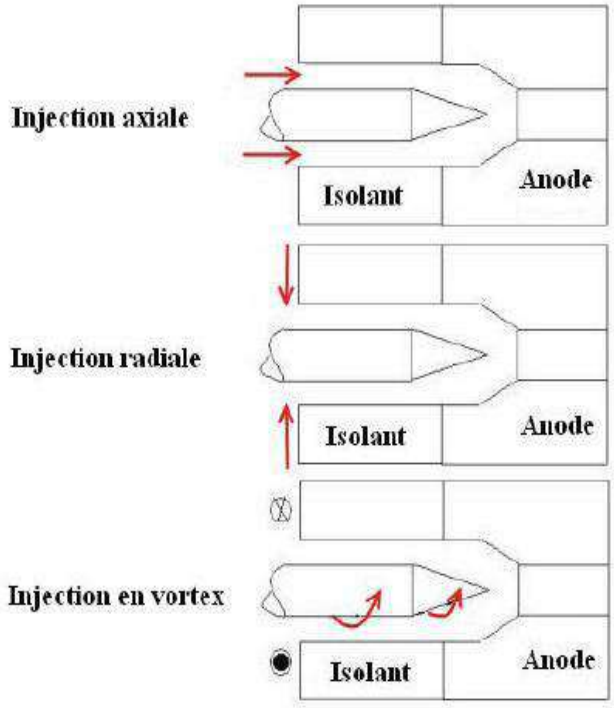


Figure I-18:*Schéma des différents modes d'injection du gaz plasmagènes dans une torche De projection plasma [11].*

I.5.3.4 : Formation du jet plasma

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

- une température à cœur élevée : de 5000 à 14000 K avec une densité de flux thermique
- Pouvant atteindre 1010 W.m-2.
- une vitesse d'écoulement élevée : de 500 à 2500 m/s
- un mélange gazeux de faible densité : 1/30 à 1/40 de la densité du mélange gazeux froid [15].

I.5.3.5 : Avantages et inconvénients du plasma

Les installations Plasma ont pour avantage de pouvoir découper des épaisseurs fines et des matériaux inoxydables, à la différence du procédé par oxycoupage. En effet, tous les matériaux conducteurs d'électricité pourront être utilisés par le plasma Concernant les épaisseurs, il y a peu de contraintes de

nos jours. Avec ce procédé, il est possible de couper jusqu'à environ 70 mm sur certaines installations. La précision du plasma est appréciable.

Grace à la fusion localisée, la déformation est plus faible est permet des précisions de 0,2 mm. Environ sur des installations récentes [16].

I.6 : Dépôts plasma

Dans le cas de la projection plasma, les travaux [17,18] montrent qu'en fait l'adhésion sur un substrat plan non rugueux est soit de type liaison de Van der Waals, ce qui implique un état de propreté de la surface impeccable, mais qui cependant, dans tous les cas, correspond à une liaison faible, soit de type diffusionnel si le substrat et le dépôt, alors en général métallique, peuvent être maintenus à une température élevée pendant le tir, ce qui implique de projeter en atmosphère contrôlée, sinon sous vide partiel [19]. Il y a alors toujours formation d'une couche d'oxyde plus ou moins épaisse sur le métal.

Lorsque les surfaces sont rugueuses, l'accrochage est essentiellement de type Mécanique quand la rugosité doit être adaptée à la taille des particules projetées [19]. En effet, lorsque la lamelle écrasée entoure le pic, elle le serre lorsqu'elle se contracte pendant son refroidissement (Figure 1.19), ceci d'autant plus si le substrat est maintenu à température ordinaire, ce qui ne permet pas ni la diffusion ni la formation d'un composé intermédiaire [19]

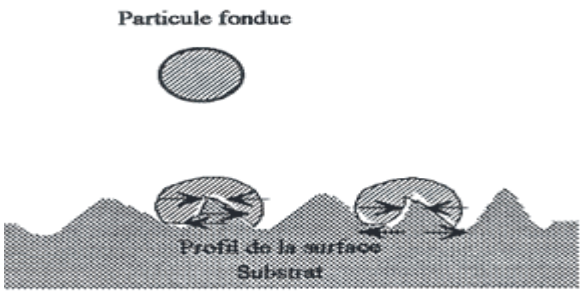


***Figure 1-19**:Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface [19].*

I-7 : Construction d'un dépôt

La construction du revêtement par projection à basse pression est similaire à la construction du revêtement en APS classique. L'aspect typique d'un empilement de particules peut être observé dans la microstructure dans le cas d'une température d'élaboration insuffisante pour la cristallisation du dépôt en cours de la projection. Une structure lamellaire (figure I.20) obtenue par des écrasements et solidification successive de particules totalement ou partiellement fondues et projetées par le jet de plasma peut contenir les éléments suivants :

- des particules infondées.

- des pores.
- des oxydes, dans le cas de présence d'oxygène dans le matériau projeté ou dans l'environnement.

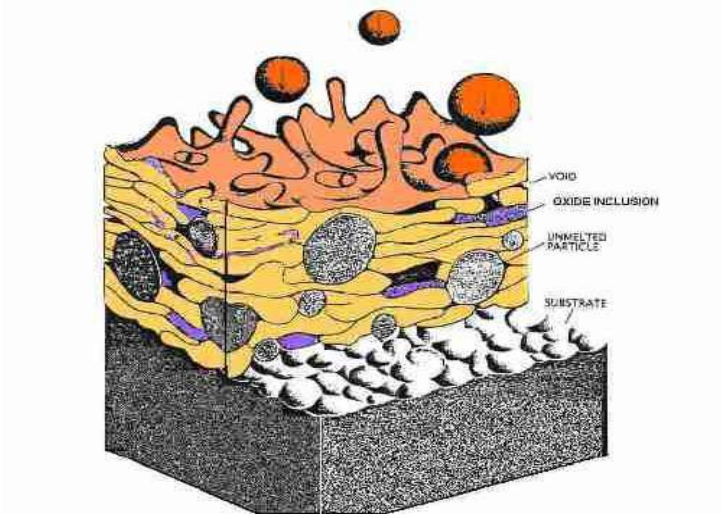


***Figure I-20**: Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique. [20].*

Ces différents éléments ont une forte influence sur les caractéristiques mécaniques du dépôt. Si la température d'élaboration avoisine la température de mise en solution du matériau, une cristallisation du dépôt a lieu et les frontières entre lamelles sont moins présentes ou disparaissent complètement, avec observation de grains. Le temps de traitement de la particule dans le jet de plasma est de l'ordre de la milliseconde. Le processus d'écrasement de la particule est très rapide, la durée entre l'impact et l'étalement d'une gouttelette est de l'ordre d'une microseconde [21]. Le mécanisme d'étalement et de solidification d'une gouttelette est et fondamental pour la projection thermique car c'est une clef de la construction du dépôt. Ce processus est dépendant de plusieurs paramètres :

- ✓ nature et forme du matériau,
- ✓ température et vitesse de la particule à l'impact,
- ✓ tension superficielle de la gouttelette,
- ✓ nature du substrat,
- ✓ température, rugosité, mouillabilité du substrat

Les interactions possibles avec le substrat ont été étudiées et classées par Kudinov [22]. La (Figure I.21) représente les résultats des écrasements en fonction du type de particule, de sa température, de sa vitesse et des conditions de mouillabilité à la surface du substrat.

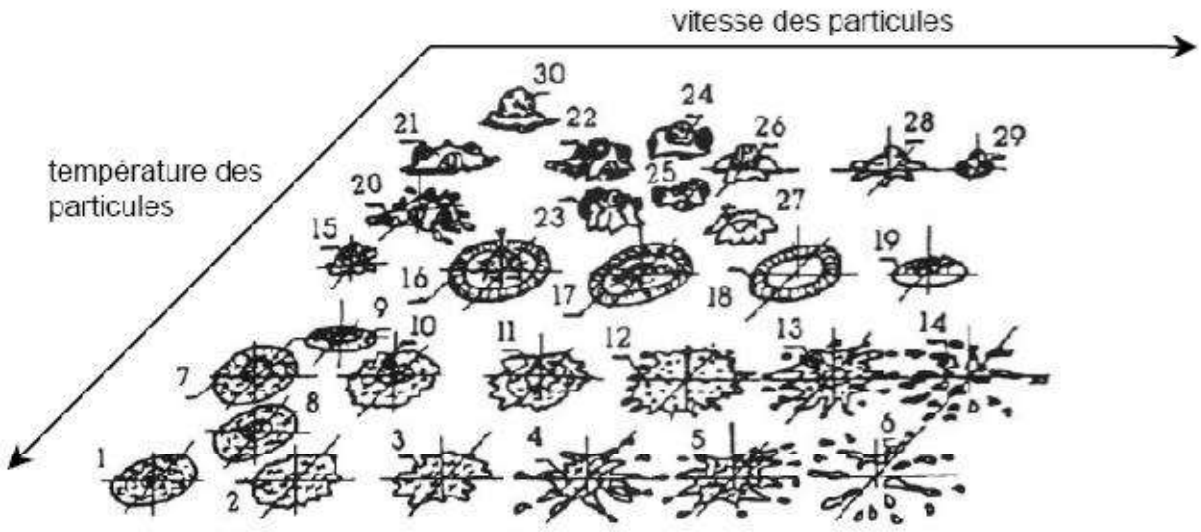


***Figure I-21**: Résultats des interactions des particules avec le substrat. [22].*

Les numéros dans la (Figure I.21) correspondent aux différents états de la particule : la particule est complètement fondue (1-6), la particule est complètement fondue avec une cavité remplie de gaz (7-11), la particule est surchauffée avec un début d'évaporation (12-14), la particule est fondue en surface (15), partiellement fondue avec un noyau solide (16-19), la particule est ré solidifiée en surface et possède un noyau fondu (20, 21, 30), la particule est ré- solidifiée en surface et possède une couche intermédiaire fondue et un noyau solide (22-30), la particule est solide et accélérée (28,29). L'éclaboussement de la particule dépend fortement de la température et de l'état de surface du substrat.

I-8 : Qualité de dépôt

La notion de «qualité» d'un dépôt est complexe : elle est fonction de l'application finale du revêtement. Par exemple, dans le cas de revêtements pour une utilisation en barrière thermique, les pores sont recherchés pour diminuer la conductivité thermique et prévenir la propagation des fissurations, les fissures perpendiculaires au substrat sont admises. Au contraire, pour les dépôts anti-usure, une plus forte densité sera recherchée. Pour les revêtements abra ables, l'usinabilité est le facteur principal à considérer.

La qualité d'un revêtement élaboré par projection plasma est influencée par plus de 50 paramètres interdépendants [23]. Leur synthèse est présentée sur la [figure I.22]. L'optimisation de ces paramètres est possible sous réserve que l'effet des variations des conditions soit connu.

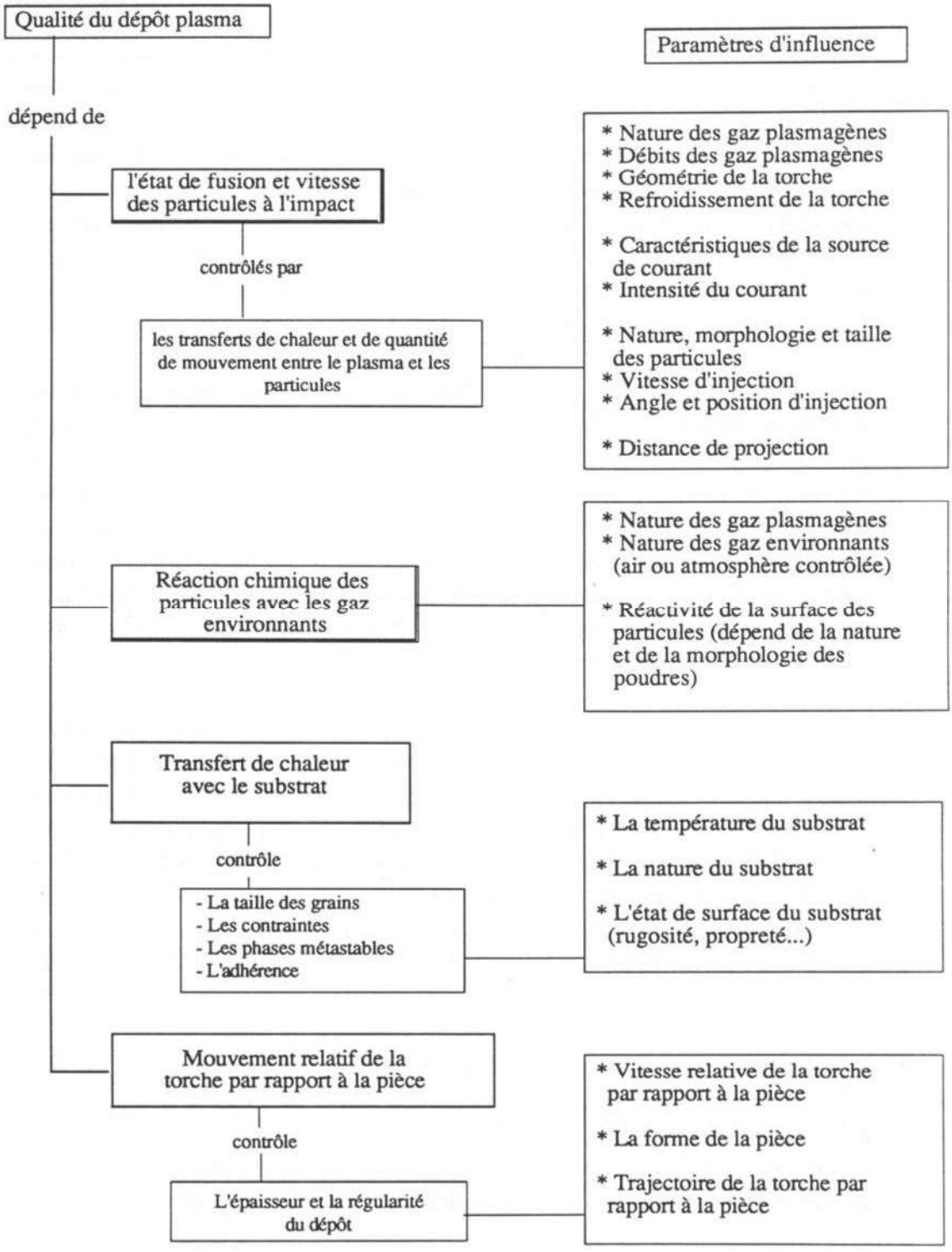


Figure I-22 : *Paramètres influençant la qualité d'un dépôt plasma [23].*

I.9 : Les applications de la projection thermique :

Les applications de la projection thermique sont très variées : revêtement contre l'usure, protection contre la corrosion et la chaleur, revêtement à propriétés électriques, réparation de surfaces endommagées... Et ces procédés sont utilisés dans de nombreux secteurs: mécanique (rouleaux de

laminoirs, guides fils, pompes, pistons…), aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique…), biomédical (prothèses, couches biocompatibles…), industrie nucléaire (protection contre la corrosion et l'usure, réacteurs chimiques…).

- **Les revêtements contre l'usure :**

Dans cette classe sont référencés les matériaux ayant :

- ✓ Une bonne résistance à l'abrasion (molybdène, chrome, alliages Ni-Cr-B-Si, Al2O3+TiO2, Cr3C2+NiAl, Al2O3, WC).
- ✓ Une bonne résistance à la fatigue (aciers, Cr3C2, alliages Ni-B-Cr, Al2O3+TiO2, Al2O3+Cr2O3, WC+Co, alliages Co-Cr-W-Si).
- ✓ Une bonne résistance à l'érosion (alliage Ni-Cr-B, Al2O3+TiO2, WC-Co, CaZrO3, Cr3C2+NiAl).
- ✓ Employés pour les bagues de frottement (bronze-Al, bronze-P, Sn, WC-Co, Mo, Ni-B-Si-Mo-WC, Al2O3+TiO2) [28].

- **Protection contre la chaleur** :

Ces revêtements ont la propriété de protéger le substrat aux hautes températures. On crée une barrière thermique en appliquant un revêtement à basse conductibilité thermique [24].

Les exigences pour de tels revêtements thermiques sont :

- ✓ Résistance à l'oxydation.
- ✓ Faible conductibilité thermique.
- ✓ Stabilité thermique.
- ✓ Coefficient de dilatation identique à celui du substrat.
- ✓ Bonnes propriétés mécaniques.

Parmi les métaux ou les alliages appliqués sont :

- Protection contre les atmosphères oxydantes (Al, Ta, alliages Ni-Cr, Cr2O3).
- Protection contre les gaz corrosifs (Al, Ta, NiCr, Ni-B-Si-Mo-WC).
- Protection contre l'érosion en dessous de 850°C (Nb, Co-Cr-W, Al2O3ZrO2, MgZrO3).
- Pour les barrières thermiques (Al2O3-ZrO2, MgZrO3, oxyde+NiAl).
- Protection contre les métaux fondus (W, MgZrO3, ZrSiO4, TiN, ZrNi, TiB2, ZrB2, Nb, Mo).

- **Protection contre la corrosion :**

Les exigences pour les revêtements anticorrosion sont [25] :

- ✓ Le mécanisme de protection cathodique.

- ✓ La résistance à la corrosion.
- ✓ La densité élevée.
- ✓ La bonne adhérence sur le substrat.
- ✓ Un coefficient de dilatation identique à celui du substrat.

Parmi les métaux ou les alliages appliqués sont :

- Dans les industries chimiques et alimentaires et en immersion dans l'eau (Al, Zn, TaCR, Cr2O3, CrB2, WSi2).
- Dans les atmosphères industrielles, salines ou polluées (Al, Zn, Cr, Ta, Cr2O3).

➢ **Revêtements à propriétés électriques :**

- ✓ Blindages radiofréquences (Al, Zn, Cu, Sn).
- ✓ Dépôts diélectriques (Al2O3).
- ✓ Bonne conductivité électrique (Al, Cu).

➢ **Revêtements pour la réparation et la mise en forme :**

- ✓ Les métaux non ferreux (Ti et ses alliages, Al et ses alliages Al-Mg, NiAl, Al-Si, Cu et ses alliages bronze Al, Co et ses alliages Co-Cr-W-Si, Ni et ses alliages Ni-B-Si, NiAl, NiCu).
- ✓ Les métaux ferreux (acier, acier au Cr, acier austénitique, acier à bas taux de carbone, fontes).

I.10 : Différentes étapes de l'oxydation

Dans la projection plasma sous atmosphère ambiante (APS),l'air froid ambiant est pompé par le jet de plasma quittant la tuyère et diffuse jusqu'au cœur du jet. L'oxygène de l'air pompé, combiné aux hautes températures rencontrées dans le plasma, peut donner naissance à des réactions d'oxydation avec les particules réactives. Des oxydes sont donc observés par plusieurs auteurs dans les dépôts de ces matériaux ; ils peuvent améliorer la résistance aux frottements, la résistance à la rupture en compression, la mouillabilité et l'adhésion des dépôts métalliques. L'oxydation de Cr3C2 (décarburation) forme par exemple des précipites de Cr7C3, vitaux pour la résistance aux frottements de ces revêtements. Ces phases secondaires peuvent aussi dégrader certaines propriétés des dépôts. La compréhension des mécanismes de ces réactions est donc nécessaire afin de contrôler le taux des phases secondaires et la qualité des dépôts. Il est possible de différencier l'oxydation dans les différentes zones. Ceci est discuté dans les paragraphes suivants.

a- Oxydation des substrats :

Les études montrent que le préchauffage des substrats améliore l'étalement des particules et l'adhésion des dépôts. Lorsque le préchauffage des substrats est obtenu en utilisant le jet plasma, la transmission thermique se fait principalement par convection et conduction (le rayonnement du plasma étant négligeable) .A l'aide de mesures par diffraction Rayleigh au voisinage du substrat, le coefficient de

transfert thermique entre le jet plasma et le substrat a été calculé : sa valeur est comprise entre 200 et 1200 W.m-2.K-1. Le préchauffage des substrats métalliques par le jet plasma sous atmosphère ambiante peut provoquer l'oxydation de leur surface, influençant les propriétés des dépôts, essentiellement l'adhésion sur les substrats. Il a été montré que les espèces oxydantes dans le jet ainsi que celle de l'atmosphère autour du substrat favorisent l'oxydation de surface. Les caractéristiques de la couche d'oxyde sont liées à la nature du substrat, à son environnement, ainsi qu'à la vitesse, à la température et au temps de préchauffage.

b- Oxydation des particules en vol :

Dans le jet plasma, les particules dépassent nettement leur température de fusion. Il en résulte de nombreuses réactions chimiques possibles en vol avec les gaz réactifs présents dans le plasma, l'oxydation étant la réaction la plus importante. Le temps de séjour très court et la complexité du plasma rendent très difficile la compréhension de ces réactions qui sont cependant particulièrement importantes lors de la projection des particules métalliques ou céramiques non-oxydes .On distingue trois types de réactions chimiques durant le séjour des particules dans le plasma.

• *L'interaction gaz-solide :* Elle est susceptible d'intervenir dès la sortie des particules de l'injecteur et avant leur fusion dans le jet. Le taux d'oxydation reste négligeable dans cette zone du fait de l'absence d'oxygène (ou en quantité très faible), d'un temps court (quelques centaines de µs), et de la température des particules relativement basse. Il faut noter aussi que dans certains cas il est possible d'obtenir la ré-solidification d'une particule dans le panache du jet si l'enthalpie du plasma ou l'échange thermique plasma particules deviennent inférieurs aux valeurs nécessaires pour garder la particule à l'état fondu. L'oxydation continue par interaction gaz-solide.

• *L'interaction gaz-liquide des particules fondues :* Au cœur du jet et dans son panache, les particules sont normalement fondues. Elles sont alors sujettes à une oxydation de cinétique plus élevée. La quantité et la nature des oxydes formés dépendent de la diffusion de l'oxygène depuis la surface vers le cœur des particules, de la quantité d'oxygène qu'elles rencontrent par le biais du pourcentage de transfert massique d'oxygène de la phase gazeuse vers la surface des particules, du temps de séjour des particules et des cinétiques des réactions d'oxydation, qui peuvent être amplifiées par les températures élevées rencontrées dans le plasma et par la présence d'espèces chimiques très réactives. L'oxydation par l'interaction gaz-liquide est considérée comme un phénomène contrôlé par diffusion. Mais le taux d'oxyde mesuré dans les particules collectées, dans certains cas, est supérieur au taux pouvant être uniquement justifié par le phénomène de diffusion. Sobolev et Guilemany, suggèrent que la diffusion peut être accélérée par l'agitation de la particule liquide. Cependant ces théories n'expliquent pas le taux très élevé d'oxyde déterminé par Espié et al. Et Ageorges et Fauchais. De plus, les nodules des oxydes ont été observés dans le cœur des particules collectées en vol.

Il a été suggéré que un débit volumique de gaz moins important, ont été aussi mis au point par certains auteurs; l'efficacité de ces montages pour réduire de l'entraînement de l'air et de l'oxydation reste dépendante du débit de gaz de gainage dans le prolongateur. D'autres auteurs ont essayé de créer le gainage gazeux sans prolongateur. Le gaz de gainage est introduit autour de jet plasma ou la flamme par un anneau. Hackett and Settles ont utilisé l'argon ou l'azote avec 3% massique d'He autour de la flamme de HVOF. Il en résulte un accroissement de la vitesse de flamme et une réduction de l'oxyde dans les dépôts de Fe quand le débit massique du gaz de gainage augmente. Volenik et al ont adapté les gaz réducteurs (N2+5%H2 ou C2H2) pour gainer le jet plasma, produit par la torche à eau, lors de la projection de l'acier inoxydable. Le gainage par C2H2 a été indiqué comme étant le plus efficace. Il a été montré que les systèmes de gainage gazeux sans prolongateur peuvent mieux contrôler l'entraînement de l'air dans le jet plasma ou dans le flamme ainsi que le taux d'oxyde dans les particules en vol. Gawne et al. Ont abouti aux mêmes conclusions. Cependant ces systèmes imposent l'utilisation d'un débit de gaz de gainage d'ordre de 20 m3.min-1. De plus, la diminution de la vitesse des particules ou de leur température dépend aussi du mode d'injection des gaz de gainage.

c-Oxydation du dépôt en croissance :

Dans le revêtement métallique, la présence d'oxyde dans le dépôt provient de différentes sources. Lors de leur séjour dans le plasma, les particules métalliques sont sujettes à l'oxydation comme il en a été discuté précédemment, et les oxydes formés se retrouvent dans le dépôt. L'inclusion des particules mal fondues, qui présentent généralement une importante couche d'oxyde en surface à la suite à leur séjour en périphérie du jet de plasma, accroît le taux d'oxyde dans le dépôt. Les lamelles, lors de leur solidification, sont exposées aux gaz chauds du plasma (2000-3500 K) contenant près de 90% d'air à 100 mm de la sortie de tuyère. Le temps de solidification des lamelles (l'ordre de quelques microsecondes) est supérieur à celui nécessaire à leur étalement (l'ordre de la microseconde). Dans ce cas, la réaction d'oxydation des lamelles est essentiellement de type gaz-solide. Les travaux montrent que cette couche d'oxyde varie entre 100 et 300 nm en fonction de l'épaisseur de la lamelle.

Pratiquement l'oxydation de dépôt se poursuit jusqu'au passage suivant devant la torche. L'oxyde dans le dépôt provient de l'interaction de sa surface (souvent maintenue de 450 à 700 K) avec l'atmosphère ambiante ou avec les espèces oxydantes du jet plasma avant l'étalement des autres lamelles sur la surface. L'oxydation introduite dans le dépôt au cours de cette étape est plus importante que celui lors de l'étalement des splats car le temps qui sépare deux passages consécutifs de la torche au même endroit et qui dépend principalement de la taille et la géométrie du substrat est nettement plus élevée [26].

I.11 : Adhérence d'une lamelle provenant de l'étalement d'une particule fondue sur un substrat.

L'adhérence et la cohésion d'un dépôt sont des propriétés vraiment importantes : un dépôt ne protégera jamais un substrat s'il n'est pas adhérent ou s'il possède de nombreuses fractures ou déaminations. Généralement, les différents types d'adhésion rencontrés en projection plasma sont de type métallique, chimique, ou mécanique. Ces différents types d'adhésion dépendent de nombreux critères tels que la nature, la taille et la morphologie du matériau à projeter ou aussi de la morphologie du substrat [27].

I.11.1 Adhésion métallique :

Ce type d'adhésion se rencontre pour les métaux et les alliages et ne peut avoir lieu que lorsque la température est suffisamment haute (le coefficient de diffusion variant comme exp(-Ea/kT) où a est l'énergie d'activation, T la température et k le coefficient de Boltzmann) et s'il n'existe pas de couche d'oxyde à la surface du substrat ou de la particule. L'adhésion métallique ne peut donc avoir lieu que lors d'un dépôt réalisé sous atmosphère contrôlée et pour un substrat maintenu à une température suffisamment élevée (par exemple 900°C pour un superalliage), pour que la diffusion se produise.

I.11.2 Adhésion chimique :

L'adhésion chimique requière que la particule fonde le substrat lors de l'impact (diffusivité de la particule doit donc être supérieure à celle du substrat), mais également qu'un composé chimique avec les deux liquides existe. C'est par exemple le cas lorsqu'une particule de molybdène (Mo) impacte sur un acier : la température de fusion et la diffusivité de la particule de Mo étant supérieure à celle du fer, ce dernier devient alors localement liquide et permet de former le composé MoFe2.

I.11.3 Adhésion mécanique :

Ce type d'adhésion se produit lorsque le substrat est rugueux, par exemple après sablage. Cette adhésion dépend de nombreux paramètres comme l'amplitude de la rugosité, souvent caractérisée par Ra et Rt (la distance entre le pic le plus haut et la vallée la plus profonde) mais également par l'espace entre les pics et les vallées. En effet, Bahbou et Nylen ont établi qu'une corrélation existe entre l'adhésion d'un dépôt de NiAl (5% en masse) sur un substrat de Ti6Al4V et la valeur de l'écart type RΔq. Ce facteur permet de prendre en compte directement l'amplitude et l'espace des pics [28]. La corrélation n'est pas optimale lorsque seuls sont considérés les Ra, Rt, ou l'espace entre les pics.

I.12.Différents types d'impact selon la nature du substrat

a. Impact sur film liquide profond

On parle de film liquide profond lorsque la couche liquide a une épaisseur de plus de 50 diamètres de goutte. Deux phénomènes peuvent se produire selon l'intensité de l'impact. Soit un vortex apparaît si les forces d'inerties et de tension superficielle sont comparables (We < 8), soit un jet se forme lorsque les force d'inerties dominent (We >8) en créant un cratère dans le film liquide après l'impact de la particule fluide. Brutin ont observé expérimentalement et montrent que seules les considérations des

nombres de Weber et de longueur capillaire suffisent à décrire la profondeur du cratère sans prise en compte de la viscosité des fluide.

b. Impact sur film liquide fin

Ce type d'impact est considéré à partir du moment où le film liquide a une épaisseur inférieure à 10 diamètres de goutte. Des études expérimentales et numériques Josserand ont montré que là encore, les conditions d'impact influencent le comportement de la goutte. Ainsi, lorsque les forces d'inertie sont prépondérantes lors de la dynamique, il se forme un jet pendant les tous premiers instants, puis celui-ci devient une corolle dont l'extrémité est un bourrelet périphérique. Ce type de comportement est appelé corolla splash. Dans la nature, cette corolle est très souvent déstabilisée pour créer des digitations et des gouttes secondaires. Ce phénomène serait dû à une instabilité de la courbure géométrique au niveau du bourrelet périphérique, et porte le nom d'instabilité de plateau-Rayleigh. Des études expérimentales ont montré que la profondeur du film influence l'angle d'éjection de la corolle puis qu'un film fin a tendance à diminuer l'angle d'éjection (voir figure 1.23) le jet qui se forme aux temps très courts est souvent à l'origine de la formation de gouttelettes provenant du lieu de l'impact. Ce type d'éclaboussure est appelé prompt splash. Dans leurs travaux, yarin ont traduit, par des expériences sur un film liquide, la formation de la corolle comme singularité cinématique c'est-à-dire une discontinuité du champ de vitesse et la distribution de l'épaisseur de film.

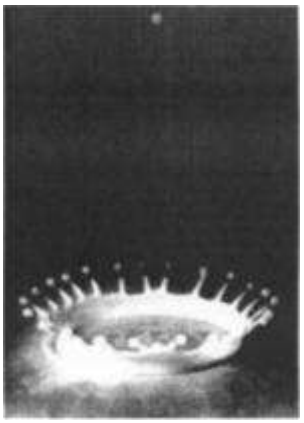


Figure I-23 : *Impact sur film liquide fin.*

c. Impact sur substrat sec

Il s'agit du type d'impact que nous allons considérer dans notre travail où la goutte s'écrase sur une surface solide et indéformable. Outre les caractéristiques physiques de la goutte et des conditions dynamiques (vitesse et diamètre de la particule fluide), la rugosité du substrat, est aussi un paramètre qui peut influencer le comportement de la goutte. Encore une fois, la goutte adopte différents comportements qui dépendent des conditions d'impact.

c.1 Eclaboussure :

Lorsque les effets inertiels sont prépondérants devant les effets de tension superficielle, ce qui peut se manifester par une faible viscosité, ou encore une forte vitesse d'impact, le fluide se déstabilise et se fragmente. Une partie de la matière reste au point d'impact et des digitations apparaissent à la périphérie de la goutte initiale. Ce phénomène nommé splash a été étudié par de nombreux auteurs afin d'estimer quels paramètres sont à l'origine des instabilités qui génèrent les digitations et les gouttes secondaires. Ainsi, des études expérimentales ont montré que la rugosité du substrat influence l'apparition su splash puisque le relief du substrat redirige le fluide après impact dans une direction désordonnée. L'énergie de surface est également un paramètre influent, car l'ajout de surfactants afin d'augmenter la tension superficielle de la goutte diminue les risques de splash. La température du substrat peut également influencer ce comportement, puisque la viscosité et la tension superficielle du fluide diminuent lorsque la température augmente, ce qui accentue les instabilités lors de l'impact.

c.2 Déposition :

Dans ce type d'impact, les effets inertiels et de tension de surface sont de même ordre de grandeur. Pour une faible taille de particule de métal liquide (de l'ordre de millimètre), cela revient à une vitesse modérée (de l'ordre 1m/s) pour une tension de surface de l'ordre de 0.5N.m. Zhao ont étudié expérimentalement l'impact de gouttes d'eau ou d'encre dans cette gamme de vitesses et tailles de particules et observent bien une déposition. La goutte s'écrase contre la surface et s'étale largement la plupart du temps sous forme d'un disque (splat) sous l'influence de l'énergie des forces d'inertie. Puis l'énergie de surface devient prépondérante et l'étalement fait place à la rétraction de la goutte jusqu'à la position d'équilibre. On observe ce comportement par exemple sur les pare-brises de voiture où les gouttes s'étalent de plusieurs rayons puis se rétractent, sur un temps très court. Beaucoup d'études ont porté sur ce genre d'impact afin de déterminer les conditions seuil où la déposition fait place au phénomène de splash, en fonction de la température de substrat ou encore de la rugosité du substrat En examinant l'impact de gouttes d'eau sur une surface sèche et plus précisément le nombre de digitations qui apparaissent à la périphérie du splat, Thoroddsen ont supposé que ces instabilités sont de type Rayleigh-Taylor. Ce type de comportement est également observé sur des gouttes métalliques de volume de l'ordre du pico litre que l'on dépose sur des composants électroniques. En fonction de la température, du métal et du composant, il est possible de déterminer la zone de contact entre la goutte et le réseau électrique et éviter ainsi les court-circuites.

c.3 Rebond :

Lors de ce type d'impact, les effets de tension superficielle sont prépondérants dans la dynamique. La goutte commence à s'étaler, puis se rétracte avec une telle intensité qu'elle décolle. Ce phénomène peut se rencontrer dans la nature comme par exemple les gouttes d'eau tombant sur une feuille ou sur

des matériaux hydrophobes. Des études ont été réalisées sur la composition de la goutte d'eau afin de diminuer ce caractère et améliorer les conditions d'étalement sur les plantes dans le but d'améliorer la pulvérisation de pesticides sur les plants. En ajoutant une faible quantité de polymère, la viscosité et la tension superficielle de la goutte sont modifiées et se rapprochent davantage du comportement de déposition [29].

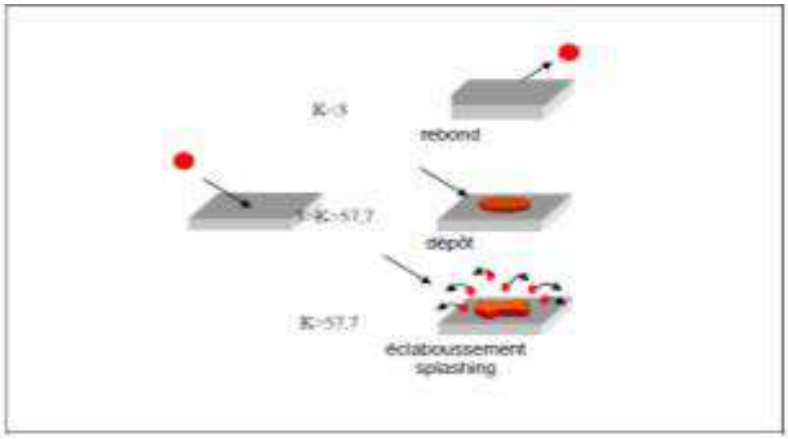


***Figure I-24** : Les différents types d'impacts en fonction de la valeur du paramètre K.*

I.13. Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat

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

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

Les deux dernières phases n'étant pas forcément séquentielles, la 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**.**

➢ I.13.1.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) 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.1)

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

Ou :

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

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

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

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

Ou :

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

D : son diamètre(m)

V : sa vitesse (ms-)

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

μ: sa viscosité dynamique (kg . m. s − 2)

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

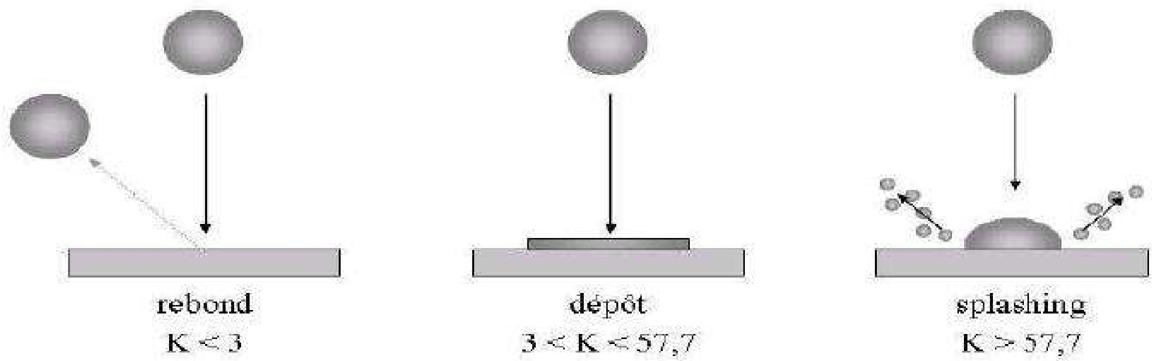


Figure I-25*: Modes d'impact.*

Les éclaboussures présentes dans le troisième mode apparaissent quelques dizaines de nanosecondes âpres l'impact et sont dues à la propagation de l'onde de pression

I.12.2.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.
L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de Surface à la fin de l'écrasement**.**

- **L'impact :**

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

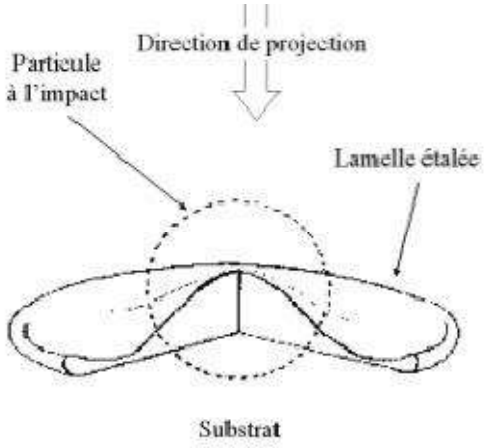


Figure I-26: Schéma d'écrasement de la particule.

- **l'étalement :**

L'étalement des particules 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 classes en deux groupes : les propriétés des particules a l'impact (le diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l'état physico-chimique etc.…) et l'état de la Surface du substrat où les particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques, etc.…).
Plusieurs études expérimentales ont été effectuées (97% sur les surfaces lisses) pour Comprendre l'influence des propriétés des particules a l'impact sur leur écrasement et la Formation des spalts. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la Température**,** de la rugosité et des

propriétés thermiques du substrat sur L'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le Substrat a été aussi évalué .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)a défini le dégréé d'étalements comme le rapport entre le diamètre de la particule étalée D et le diamètre d de la particule avant l'impact (équation I-4)

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

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

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

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-6) **.**

$$\boldsymbol{\varepsilon = A.R_e^b} \text{..... (I-6)}$$

Où :

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

- **I.12.3.La Solidification des lamelles :**

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle substrat varie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène [30].

I.14.L'état de l'art

La projection de gouttelettes métalliques sur une cible est une technique largement utilisée dans l'industrie. Cependant les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont pas très bien maîtrisés puisque les interactions entre les gouttes de liquide, la solidification ainsi que la refusions éventuelle par projection de gouttes sur les précédentes sont difficiles à analyser en raison des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la microseconde et du micromètre.**[31]**Ont étudier, la formation de liaison de la fonte plaque de fer déposée sur un substrat en aluminium préchauffé par la pulvérisation de plasma atmosphérique a été étudiée en utilisant un méthode des éléments finis basée sur un modèle de transfert de chaleur construit dans un système de coordonnées cylindriques. Pour améliorer la

précision des calculs, la résistance de contact thermique (Rth) du l'interface de contact a été intégrée dans le calcul. UNE une valeur Rth précise a été obtenue en utilisant un relation. Le diamètre des grains dans le splat était déterminée par analyse par microscopie à force atomique. De plus, les paramètres physiques de la fonte et du aluminium à différentes températures utilisé dans la simulation ont été calculés en fonction de la composition du matériaux. Les calculs ont indiqué que l'interface la température était inférieure au point de fusion du substrat pendant toute la période d'observation, confirmant qu'aucune fusion des le substrat d'aluminium s'était produit. Ainsi, la formation de la liaison métallurgique splat-substrat a été attribuée à la température d'interface améliorée et la déformation plastique plutôt que la fusion de la surface du substrat.**[32]** Il est très important de bien comprendre le processus dynamique de la splatformation unique pour optimiser le procédé de pulvérisation au plasma. Dans la présente étude, un modèle tridimensionnel comprenant le transfert de chaleur et la phase a été développé sur la plate-forme Ansys Fluent 14 pour simuler l'impact, l'aplatissement et la solidification une gouttelette fondue sur un substrat solide pendant la pulvérisation au plasma. La phase, la pression de contact, la température et les champs de vitesse à différents moments d'épandage ont été présentés pour mieux comprendre la formation d'éclats mécanisme. La morphologie des splats prévue était en bon accord avec les photos expérimentales. Le effet de la constante de la zone pâteuse, un paramètre dominant le comportement de solidification du fluide dans Fluent, sur l'aplatissement des gouttelettes a été étudié plus avant. En comparant le facteur de propagation calculé à partir de modèle actuel avec la valeur expérimentale, une constante de zone pâteuse de 108 ou 109 s'est avérée plus approprié pour la simulation du problème de solidification survenant lors preuve directe sur le substrat la fusion pourrait être obtenue. L'écart dans les données calculées peut être principalement attribué aux facteurs suivants. Tout d'abord, l'interface était supposé être une interface parfaitement contactée. Plus précisément, en raison de la forte activité de l'aluminium dans un oxydant l'atmosphère, la surface du substrat était sujette à l'oxydation pendant le dépôt. Le film d'oxyde formé probablement conduction thermique du substrat splat entravé. Deuxièmement, le les valeurs des paramètres des matériaux ont été tirées des rapports références et ont été supposés indépendants de la température et de la phase. En pratique, les paramètres physiques sont un fonction de la composition, de la phase et de la température appliqué. Généralement, Rth ou h a été utilisé pour résoudre la chaleur problème de transfert de l'interface non idéale entre un particule fondue et une surface solide .**[38]** développé un modèle tridimensionnel en utilisant un algorithme de suivi du volume pour suivre la surface libre des gouttelettes d'eau heurtant sur une surface solide. Pasandideh-Fard et al en ajoutant

le transfert de chaleur et la solidification au modèle 3D. L'effet de la résistance de contact thermique sur l'étalement et la solidification a été étudiée dans ses travaux ultérieurs.**[39]** ont étudié l'impact de particules d'alliage d'aluminium partiellement fondues sur un substrat en acier à outils H13. Le modèle est en bon accord avec l'expérience et les données numériques antérieures. le présent modèle a montré que la température du gaz environnant a un grand effet sur la forme de la fissuration. Cette partie du travail concerne l'impact de deux gouttes successives sur une cible; Particulièrement sur les études de phénomènes associés aux particules en fusion. L'analyse montre que l'impact de la seconde goutte transfère la chaleur à la première lamelle, sous une pression, phénomène qui joue un rôle déterminant dans la morphologie finale des lamelles; par lequel l'énergie cinétique initiale est convertie plus ou moins rapidement aux forces visqueuses et à l'énergie de surface.**[40]** ont photographié le débarquement fondu de gouttelettes de bidon décentré sur un étalement circulaire constitué par l'impact et la solidification des autres, baisse identique. Les formes finales de l'étalement étaient sensibles à l'espacement entre les centres de gouttelette, employé un modèle tridimensionnel de la propagation et de la solidification employé pour simuler des interactions entre les gouttelettes. Le modèle a appliqué une méthode eulérienne de volume de commande de fixe-grille pour résoudre les équations de dynamique des fluides et d'économies d'énergie. Les prévisions des formes de gouttelette pendant l'impact du modèle étaient conformes bien aux photographies. Par des variations suivantes de la température à différents points sur la surface du premier étalement nous pourrions identifier des endroits où la refonte s'est produite et les étalements ont fusionné. Les formes de l'étalement observées dans les expériences avec de grandes gouttelettes de bidon ont qualitativement ressemblé à ceux obtenus par les poudres de plasma-pulvérisation de nickel sur une surface en acier.**[41]** Ont appliquent Un modèle 3D complet intégré a été développé pour étudier les phénomènes de transport en gaz soudure à l'arc électrique en métal (GMAW). Ceci inclut le plasma d'arc, génération de gouttelette, transfert et impact sur la piscine de soudure, et dynamique de piscine de soudure. La formulation de continue est employée pour les équations de conservation de la masse, et de l'énergie dans la zone en métal. La surface libre est dépistée utilisant la technique du (VOF). Les résultats numériques montrent les distributions temps-dépendantes de la pression d'arc, densité de courant, et le transfert de chaleur sur la surface d'objet sont différent des distributions gaussiennes présumées dans les modèles précédents. On l'observe également que ces distributions pour un arc mobile sont non-axisymétriques et le décalage de crêtes à la direction mobile d'arc.**[42]** ont présenté Dans cette étude, la simulation numérique de l'écrasement d'une particule fondue d'alumine de taille micrométrique (25µm) sur un substrat

en acier inoxydable est la représentée par un modèle numérique par éléments finis. L'effet de la vitesse d'impact sur la cinétique de la particule ainsi que sur l'histoire thermique du système dépôt/substrat a été étudié**[36,43,44]** ont déterminer des valeurs Rth ou h précises est important pour obtenir une compréhension précise et détaillée de la chaleur problème de transfert ainsi que pour fournir des preuves explicites quant à savoir si le substrat peut être fondu. Ici, nous avons examiné la formation de liaison d'une fonte

splat déposé sur un substrat en aluminium préchauffé à l'aide d'un méthode de simulation numérique basée sur des données expérimentales. Plus précisément, Rth utilisé dans la simulation a été calculé en utilisant une relation bien établie. De plus, nous calculé les paramètres physiques de l'éclat et du substrat à différentes températures. Cette étude fournit et des preuves solides permettant de déterminer si la fusion du substrat est possible, ce qui est un facteur critique pour comprendre le mécanisme de liaison splat-substrat.

[45] Ils présentent une simulation basée sur le suivi de front de la déformation et processus de solidification d'une goutte de liquide sur une plaque inclinée selon un angle / p compris entre 10 et 80. La plaque la température est maintenue fixe à une valeur inférieure à la température de changement de phase liquide-solide de la goutte de liquide

tandis que la goutte est supposée coller à la surface. La goutte subit une déformation oscillante, et quand il atteint presque une forme stable, le processus de solidification commence à subir une expansion de volume (qsl = 0,9). Ils ont présenté un numérique à deux dimensions entièrement résolu étude d'une goutte de liquide se solidifiant sur une paroi froide verticale par la méthode de suivi avant pour suivre le mouvement temporel de la interfaces. La condition aux limites de vitesse antidérapante sur le solide surface est satisfaite par une technique d'interpolation linéaire. La force gravitationnelle se traduit par une goutte asymétrique dont la pointe conique induite par l'expansion volumique est décalée vers le bas après solidification complète. Nous avons fait varier le nombre de Prandtl Pr (dans la plage de 0,01–1.0), le nombre de Stefan St (dans la plage de 0,01 à 1,0), le Bond nombre Bo (dans la plage de 0,1 à 3,16), le nombre Ohnesorge Oh (dans la plage de 0,001 à 0,316), le rapport de densité du solide au liquide phases qsl (dans la gamme de 0,8 à 1,2), et l'angle de croissance / gr (dans le de 0 à 20) et l'angle de contact / 0 au mur (dans la plage de 45–135) pour montrer leurs influences sur la forme, la hauteur et le décalage de la pointe de la goutte solidifiée et du temps de solidification. Le numérique les résultats montrent que la forme de la goutte solidifiée est fortement influencée par Bo, St, Oh, qsl, / gr..**[46]** Le changement de phase

solide – liquide des gouttes est d'une importance cruciale parce que le processus existe largement dans la nature et les phénomènes d'ingénierie. Par exemple, des gouttes d'eau gèlent sur les feuilles**[47]** gelé une goutte d'eau sessile sur une plaque en abaissant la température de la plaque à une valeur inférieure à la point de congélation de l'eau. La couche de glace initialement formée au niveau de la plaque propagé au sommet pour terminer la solidification. Similaire des travaux ont été effectués à Zhang et al. **[48]** ont signalé la formation de gouttes coniques solidifiées induite par l'expansion du volume et les angles de croissance à la trijonction. Sur la base d'une analyse théorique appuyée par les expériences, Satunkin a constaté que l'angle de croissance à la tri-jonction est presque constant sauf vers la fin du processus de solidification.Un autre travail concernant la cristallisation d'un silicium fondu goutte peut être trouvée dans Itoh et al. **[49]** utilisé une méthode de Boltzmann en réseau pour simuler une goutte de liquide se déplaçant sur une paroi verticale. Cependant, les travaux précités n'ont pas envisagé de transfert thermique de solidification. Même s'il y a eu de nombreuses études numériques sur la transfert de chaleur à changement de phase de gouttes liquides, elles se sont principalement concentrées sur la plaque horizontale. La solidification en goutte sur un mur vertical est rarement trouvé. Par conséquent, combler cette lacune est l'objectif principal de la présente étude en raison de son importance dans le domaine universitaire et applications techniques.**[50]** Un modèle numérique complet a été développé, qui est capable de représenter l'impact et étalement d'une gouttelette fondue à haute vitesse en zircone stabilisée à l'yttria (YSZ) avec formation de microstructures dans les procédés de projection thermique plasma. Le modèle numérique implique la solution explicite de différence finie des équations de Navier-Stokes et des équations de bilan énergétique, couplées à l'équation de Cahn-Hilliard pour suivre l'interface biphasique liquide-gaz et avec un modèle de champ de phase pour la microstructure de solidification formation impliquant la croissance polycristalline. Des procédures de modèle numérique sont données. Le modèle, après vérification de l'indépendance des mailles, a été appliqué pour étudier l'étalement et la solidification d'un des gouttelettes YSZ à haute température et à haute vitesse frappant une surface de substrat préchauffée dans les conditions typiques des processus de projection thermique par plasma supersonique. De vastes simulations numériques ont été effectuées et les résultats révèlent que la microstructure de solidification formée dans la gouttelette d'étalement est constituée principalement de grains colonnaires. Les résultats calculés sont également comparés aux expériences de projection thermique,et un accord gratifiant est obtenu.**[51]** modélisé l'impact de partiellement fondu gouttelettes de zircone, et décrit en détail le gel induit éclaboussant, constatant que c'était la décélération du déclenché des

éclaboussures. Un modèle axisymétrique bidimensionnel basé sur une méthode des éléments finis a été développée par Oukach et al.**[52]** ils ont présenté les résultats de simulation numérique directe d'ungoutte de liquide sur une plaque inclinée par la méthode de suivi avant. Le la goutte de liquide, qui est supposée épingler la surface de la plaque de température en dessous du point de solidification, subit un processus de déformation avant la solidification. Pendant la déformation, la goutte effectue quelques oscillations. Lorsque la forme de la goutte atteint presque une stabilité état, le processus de solidification commence avec son interface à changement de phase se déplaçant vers le haut de la plaque vers le haut de la goutte. Sous la présence d'une expansion de volume, une pointe conique avec un angle / t est produit au sommet de la goutte après solidification complète. Le la pointe se déplace vers le bas en raison de l'inclinaison de la plaque, ce qui entraîne une goutte solidifiée asymétrique avec un certain décalage de pointe Dxt. La goutte oscille plus fortement lorsque l'un des angles de la plaque / p, la goutte angle de mouillage / 0 et le nombre de Bond Bo augmente. Pour la solidification (tableau 2), la goutte solidifiée est plus asymétrique avec un augmentation de Dxt et du temps de solidification ss lorsque chacun de / p, / 0 et Bo augmente. En revanche, une augmentation du rapport de densité solide / liquide qsl entraîne une diminution à la fois de Dxt et de ss. Concernant le angle de pointe / t, il augmente avec une augmentation de qsl alors qu'il n'est pas beaucoup affecté par / p, / 0 et Bo. Liée à l'angle de croissance / gr, une augmentation de / gr dans la plage de 0 à 28 entraîne une augmentation.

D’après les études précédents en commence notre travaille qui étudier influences de champ magnétique sur l’etalment des particules d’aluminium sur un substrat oxydé

II.1.Introduction :

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

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

II.2. écoulements bi phasiques :

Les écoulements bi phasiques peuvent être classés selon les phases en présence (liquide, solide, ou gaz) ou selon la distribution spatiale des interfaces.

Pour le premier cas, les combinaisons possibles sont les suivantes :

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

Concernant le second cas, on distingue les écoulements suivants :

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

II.2.1.Modélisation bi phasique liquide/solide : [58]

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

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

$\boldsymbol{\alpha}$i = $\boldsymbol{\alpha}$ ET $\boldsymbol{\alpha}$s = 1 − $\boldsymbol{\alpha}$

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

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

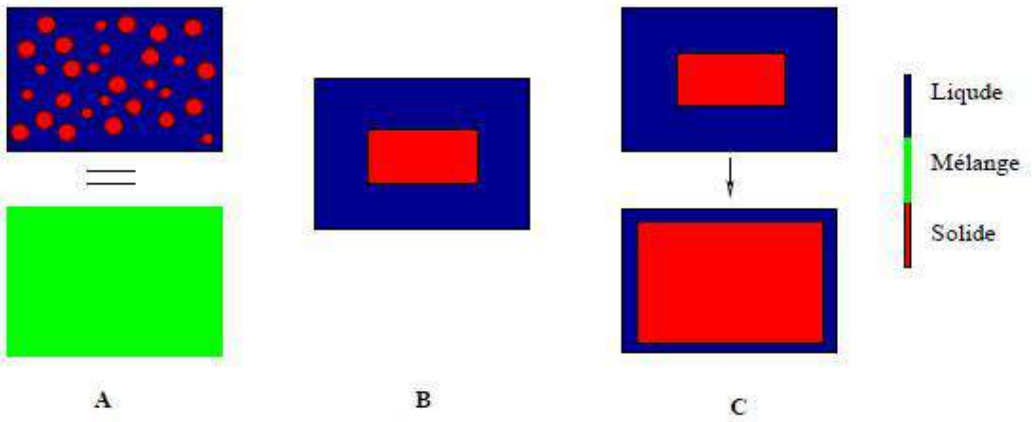


Figure II.1Répartition des phases pour trois problèmes bi phasiques types : A Mélange homogène ; B Répartition statique des phases ; C Problème dynamique de type changement de phase

II.3 .model dynamique :

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

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

La formulation mathématique des lois de la conservation régissant les phénomènes physiques comme les écoulements de fluides **[59]**.

II.3.1. 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.3.1.1. 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. **[59]**

L'équation de continuité globale est donnée par :

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

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

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

II.3.1.2. 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.

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

Où :

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

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

P : la pression.

$\vec{g}$: la gravité.**[59]**

II.3.1.3. Équation de l'énergie

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

$$\boldsymbol{D=\frac{k}{\rho c}}$$

T : température.

q : source volumique. **[59]**

II.4. 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 . **[60]**

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

II.4.1. Transfert de chaleur avec changement de phase

Les premières publications sur le changement de phase remontent à Stefan (1891) **[61].** 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 **[62].** 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.4.1.1. Méthode à grille mobile

Les méthodes à maillage déformable se fondent sur la formulation classique de Stefan définie de la manière suivante **[63]** :

Dans le domaine occupé par la phase liquide l :

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

Dans le domaine occupé par la phase solide s :

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

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

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

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

ϑ_nLa 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 **[63]**.

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.4.1.2. 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.4.1.2.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 **[64].** Sous ses différentes formes. Voller a en outre écrit cette méthode dans sa forme la plus utilisée jusqu'à aujourd'hui **[65].**

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

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

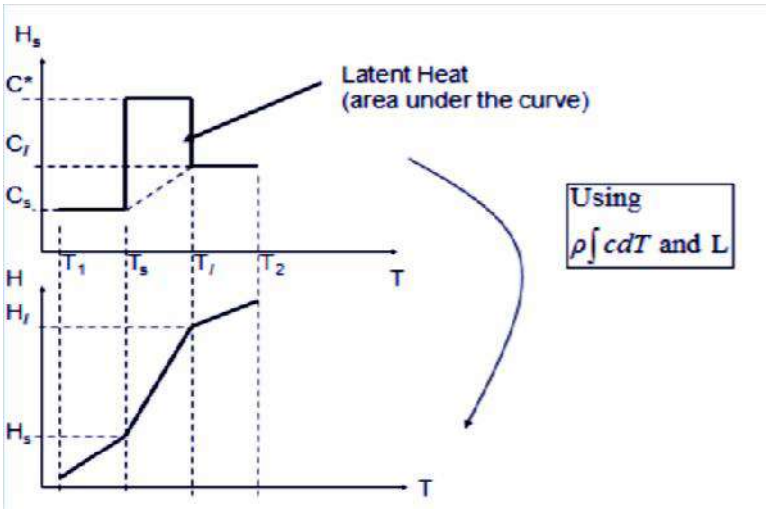


Figure II.2 : Évolution de l'enthalpie en fonction de la température

La conservation de l'énergie s'exprime alors.

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

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

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

Et en fonction de la température

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

II.4.1.2.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 **[66]**. Ainsi, si le chemin de

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

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

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

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

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

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

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

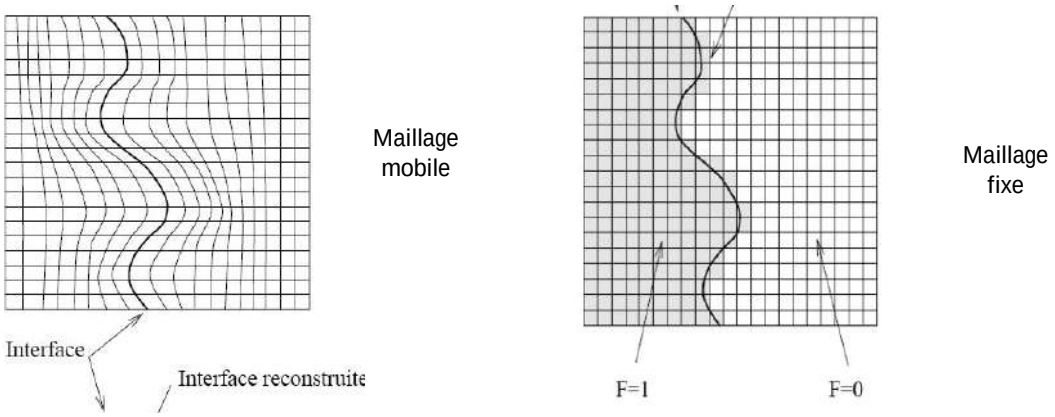
II.4.2. Modèle thermique utilisé

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

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

II.5.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 **[67].**

II.5.1La méthode lagrangienne :

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

II.5.2 .La méthode eulérienne :

Elle consiste à discrétiser les équations sur le domaine entier qui englobe les deux fluides. Les conditions limites sont externes et n'ont pas de lien avec l'interface entre les deux fluides .l'avantage de cette méthode est de s'adapter parfaitement au maillage cartésien uniforme fixe, elle est donc moins couteuse que la precedente.de plus, les phénomènes de rupture d'interface ne se posent pas de problème de structure dans ce type de méthodologie. Des simulations numérique ont été réalisées grâce à ce principe sur l'impact séquentiel de deux gouttes, La seconde s'écrasant sur une lamelle stabilisée formée par la première **[68]** ; 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.5.2.1. Les méthodes de suivi de front :

Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

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

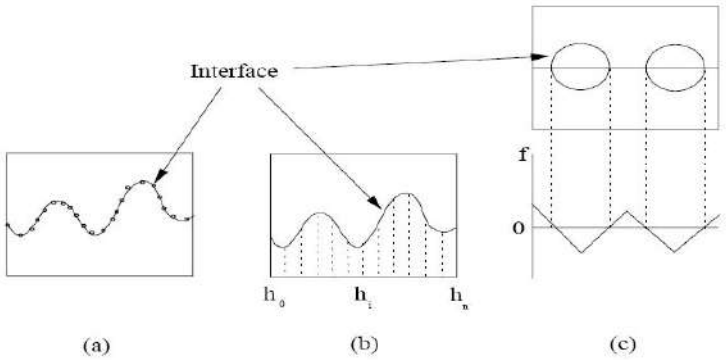


Figure II.4: Différentes méthodes de suivi de front

a)marqueur de surface.
b) fonction de hauteur.
c) méthode de ligne de niveau **[69].**

II.5.2.2. Les méthodes de suivi de volume :

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

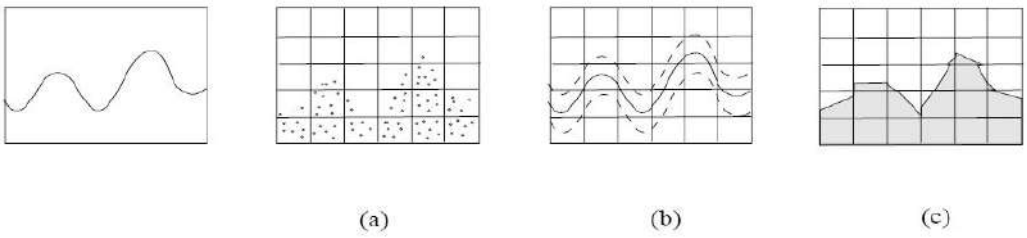


Figure II.5: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque **[70,71].**

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

On utilise pour la méthode VOF (volume of fluide) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur d'une et une maille vide à une valeur 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 (figureII.6)

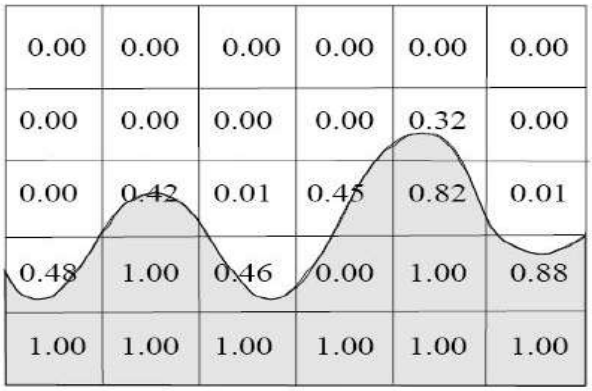


Figure II.6 : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret **[72].**

II.5.3. La Méthode VOF

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

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

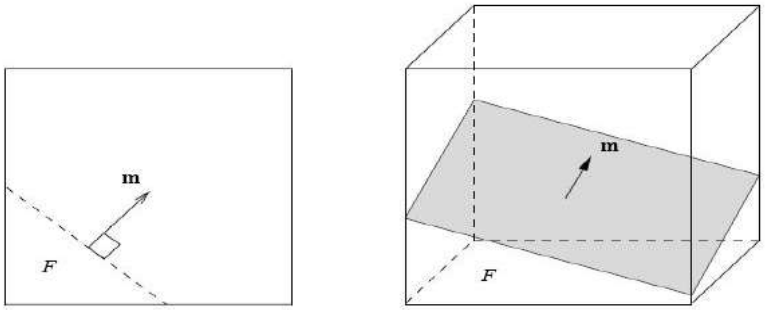


Figure II.7 : Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique **[73].**

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

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

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

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

Var correspond à la viscosité, la conductivité, etc

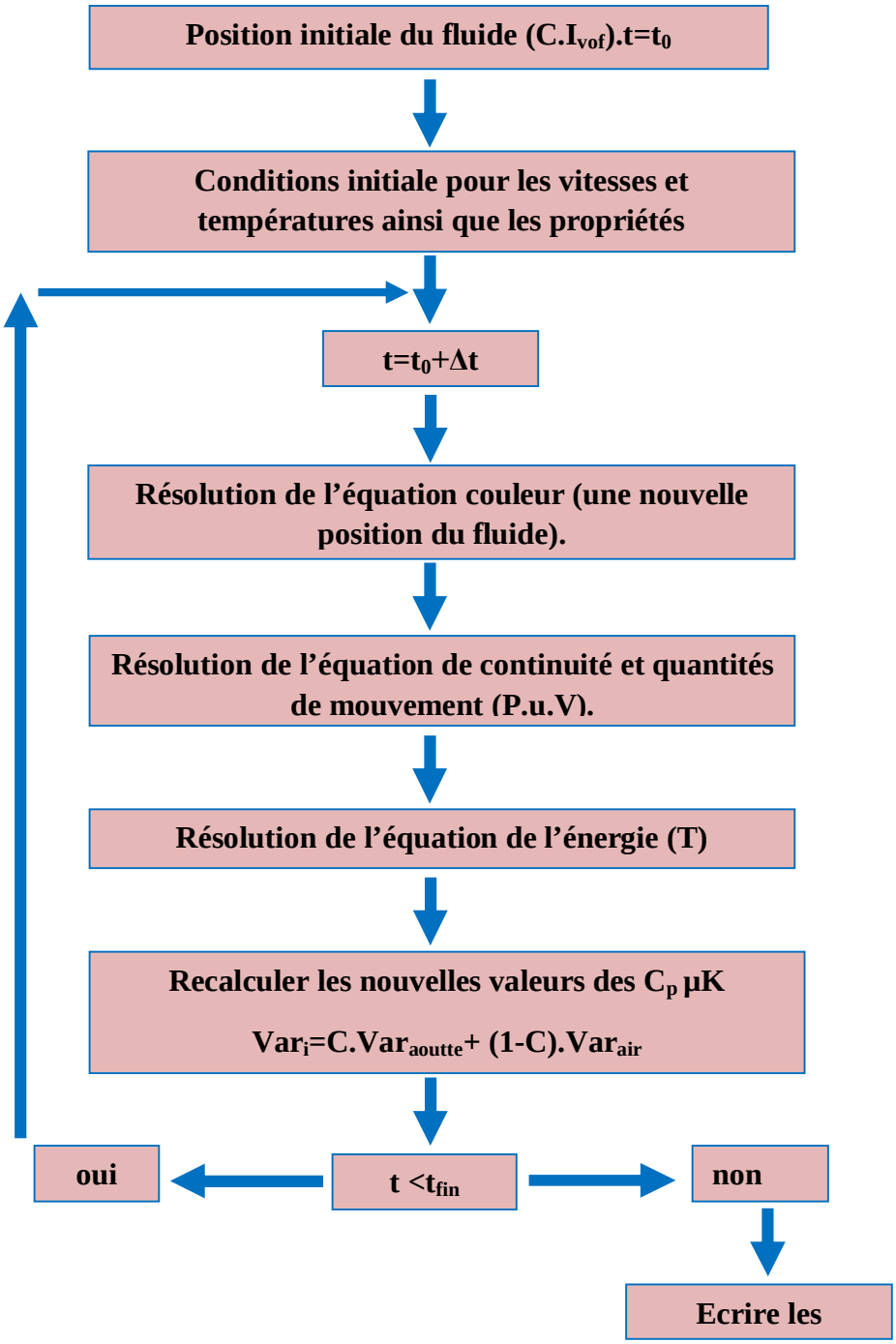


Figure II.8 : Stratégie de calcul pour la résolution du système d'équation dans le temps**.**

II.6.Conclusion

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

❖ Introduction :

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

❖ III.1. méthodes de discrétisation :

➢ III.1.1 Les trois grandes familles de méthodes

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

- Méthode des différences finies.
- Méthode des volumes finis.
- Méthode des éléments finis. **[74]**

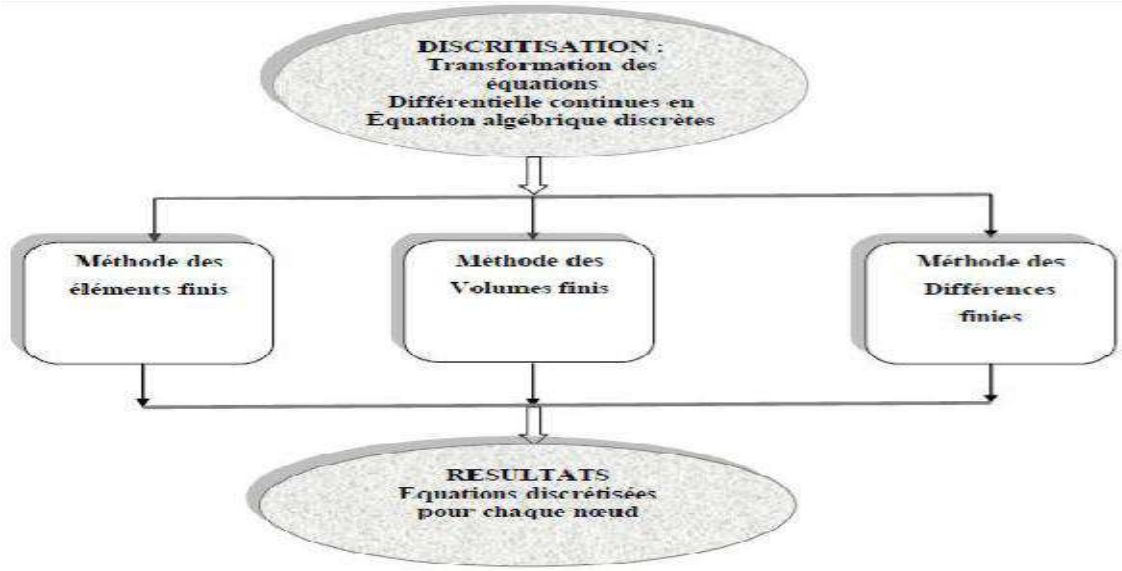


Figure III.1 : méthode de discrétisations **[75]**

➢ III.1.1.1 Méthode des différences finies :

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

Avantage :

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

Inconvénients :

- Limitation de la géométrie des domaines de calculs.
- difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.
- en général absence de résultats de majoration d'erreurs **[76].**

➢ III.1.1.2. Méthode des volumes finis :

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de Volume de contrôle juxtaposé. Chacun de ces derniers englobe un "nœud principal". La méthode des volumes finis intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de la quantité de mouvement, équation de conservation de l'énergie. Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des Parallélépipèdes rectangles en dimension 3) **[76]**.

Avantage :

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

Inconvénients :

- Moins précis que les méthodes spectrales.
- on dispose de peu de résultats théoriques de convergence **[76]**.

➢ **III.1.1.3.Méthode des éléments finis :**

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

Avantage :

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

Inconvénients :

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

➢ **III.1.1.3.1 .Démarche éléments finis :**

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

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations **[77]**

III.1.1.3.2. Présentation de la méthode :

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

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

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

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

III.2. Résolution des équations par éléments finis :

III.2.1.Introduction : Méthodes des éléments finis :

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode D'interpolation et une méthode vibrationnelle.

Etant donnés un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0,

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

• b) la méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations.

Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément,

elle est évaluée en n'importe quel point de l'élément par interpolation.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_h^k$ est de la forme **[78]**:

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

Où :

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

N_i : la fonction d'interpolation associée à x_i,

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

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

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 $\emptyset_\square$ à préciser

La méthode de Galérien 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 $\emptyset_\square = N_\square$.

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

- **III. 2.2.1Formulation variationnelle forte**

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s'´ecrit alors comme suit : Trouver u(x) $u(x) \in$ espace des solutions U_S tel que **[79-80]** :

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

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

III.2.2.2. Formulation variationnelle faible:

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

1. approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par $\tilde{u}$tel que **[81]** :

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

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

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

$$\varepsilon = \square(\tilde{u}) - \square \neq 0 \text{……. (III.4)}$$

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

$$\int_{\Omega} W_k(\square(\tilde{u}) - \square)d\Omega = 0, k = 1,2,..N \quad \text{(III.5)}$$

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

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

On pose

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

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

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

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

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

- **III.3. Forme généralisée des équations du système : [82]**

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

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

D'advection transitoire.

$\emptyset$: Variable généralisée.

$C_{\emptyset}$: 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 **[82].**

➢ III.4.choix d'un maillage

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

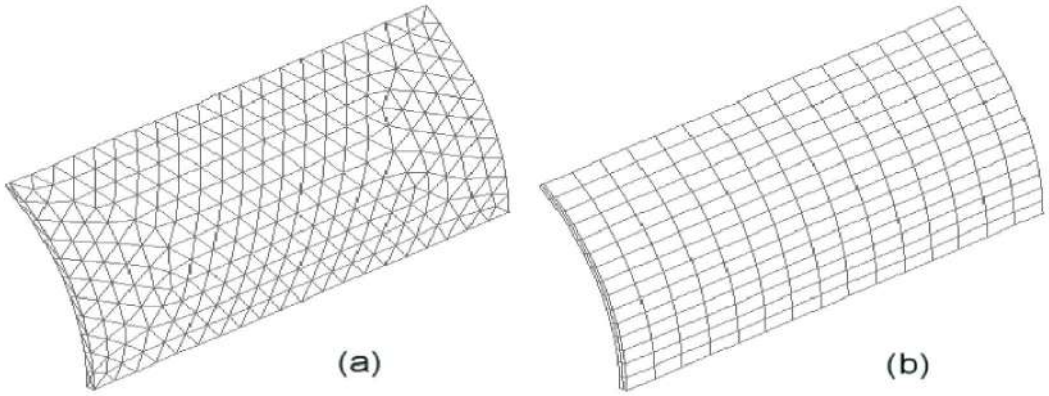


Figure III-2 dynamique de l'arc dans une torche de projection plasma. Thèse de l'université de Limoges ((a) élément tétraédrique ;(b) élément hexaédrique)

➢ III.4 .1.discrétisation

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

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

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

➢ III.4 .2. Terme temporelle

Le premier des contributions de la matrice élémentaire est le terme de transition. Sa forme générale est simplement **[81]** :

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

Avec :

$\mathbf{W^e}$:La fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme.

Pour le nœud i

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

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

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

Si l'approximation localisée de masse est employée.

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

Où :

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

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

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

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

Où :

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

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

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

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

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

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

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

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

➢ III.4.3. Terme d'advection

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

➢ III.4.3.1. Approche monotone Streamline Upwind (MSU)

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

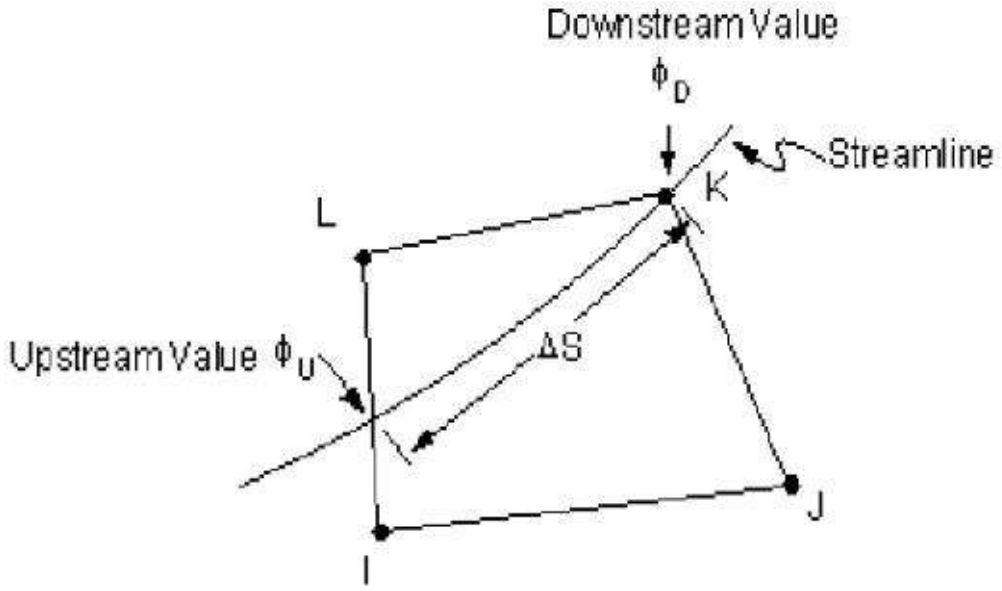


Figure III.3 l'approche de ligne de courant d'Upwind **[82].**

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

Dans le transport pur d'advection, on suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques, c.-à-d. tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut supposer que le terme d'advection, s'écrit **[82]** :

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

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

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

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

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

ou:

D = Indice de la valeur au niveau du nœud aval

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

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

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

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

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

L'approche de SUPG se compose d'une discrétisation de Galerkin du terme d'advection et d'un additionnel de diffusion-un terme de perturbation qui agit seulement dans la direction d'advection **[82]** :

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

Où: C2τ = coefficient global réglé à 1,0

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

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

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

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

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

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

L'approche de COLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué. Dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesses, (les vitesses nodales élément-élément-based) qui sont faites pour satisfaire l'équation de continuité, tandis que les vitesses traditionnelles sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement **[83]**.

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

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

❖ III.4.4. Terme de Diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au-dessus du domaine de problème après la multiplication par la fonction pesante **[83]**.

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

Toutes les variables en x ou y sont traitées de mode semblable. Par conséquent, l'illustration est avec le terme dans la direction de x. Une intégration par partie est appliquée **[83]** :

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

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

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

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

La matrice de diffusion peut maintenant être exprimée comme:

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

❖ III.4.5. Termes source :

L'évaluation des termes de source se fait comme suite **[83]:**

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

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

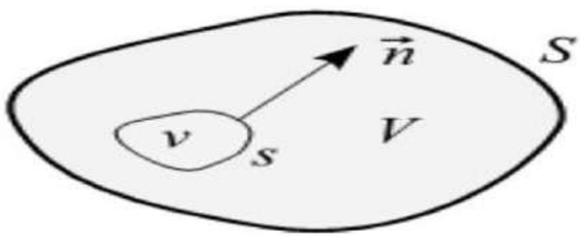


Figure III.4 bilan thermique

La puissance thermique stockée dans V est égale a la somme de la puissance thermique q généré e par les sources volumiques contenues dans V et de la puissance thermique reçue sous forme de flux à travers la surface S **[83]** :

$$\int \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -n\,(-\overline{\lambda grad} T)\, ds \qquad \text{(III-28)}$$

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

$$\rho C_p \dot{T} - \text{div}(\overline{\lambda grad} T)\, q = 0 \qquad \text{(III-29)}$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (III-28) s'écrit dans le repère orthonormé (x, y) [12] :

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

III.5.Forme discrétisée :

Elément finis : La solution analytique de l'équation (III-30)est en général inaccessible ,on est donc conduit à chercher une solution approchée par une méthode numérique : la méthode des éléments finis ,cette méthode est un cas particulier de la méthode de Galerkin :le champ de températures et les fonctions test appartiennent au même espace de dimension fine , le domaine V est décomposé en sous –domaines Ve de forme géométrique simple (les éléments)relies entre eux en des point appelés nœuds ,cette opération s'appelle maillage **[83]**

❖ **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les trois méthodes de base utilisé pour la discrétisation d'un problème couplé dynamique et thermiques avec solidification rapide; on a fait une discrétisation de l'équation de transport par la méthode des éléments finis qui a permet de faire le passage de l'EDP vers des systèmes algébrique facile à résoudre relativement. Pour éviter les étapes de programmation numérique qui nécessité beaucoup de temps on propose d'utilise le logiciel de calcule ANSYS qui et représenté dans le chapitre suivant.

IV -2.Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats des simulations numériques d'impact des gouttes sont présentés pour différentes configurations. Tout d'abord, on considère l'impact d'une goutte sur un substrat solide puis l'impact simultané de gouttes identiques.

IV -3.Présentation du code de calcul ANSYS

ANSYS est un ensemble de programmes puissants, basé sur la méthode des éléments finis, pour la simulation des divers problèmes rencontrés en engineering, capable de résoudre un large éventail de problèmes allant des analyses linéaires les plus simples aux problèmes non linéaires les plus complexes. ANSYS contient une très riche bibliothèque d'éléments qui peut virtuellement modéliser n'importe quelle géométrie. Il a aussi une large bibliothèque de lois de comportement allant des plus simples aux plus sophistiquées et qui peut simuler le comportement de pratiquement tous les matériaux typiques en engineering tels que le béton, l'acier, le caoutchouc, les polymères, les composites, et les céramiques. Conçu comme un programme général de simulation, ANSYS peut être utilisé non seulement pour l'étude des problèmes de structures mais aussi pour la simulation d'autres problèmes tels que le transfert de chaleur, la diffusion de la masse, l'analyse thermale électrique couplée…. Parce qu'il comprend plusieurs composantes telles que : ANSYS/professionnel, ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Structural, ANSYS/LS-DYNA, ANSYS/Flotran,…etc .Chaque composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (types d'éléments, conditions aux limites, tracés,…etc).Dans notre étude, on a utilisé le module ANSYS/Multiphysics dans Flotran, qui permet de traiter la majorité des problèmes de dynamique des fluides et de transferts de chaleur. Il offre des outils très puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions, en utilisant un des éléments thermo-fluides : l'élément FLUID141, pour la simulation 2D [86].

IV **-3.1.Schéma de logiciel ANSYS :**

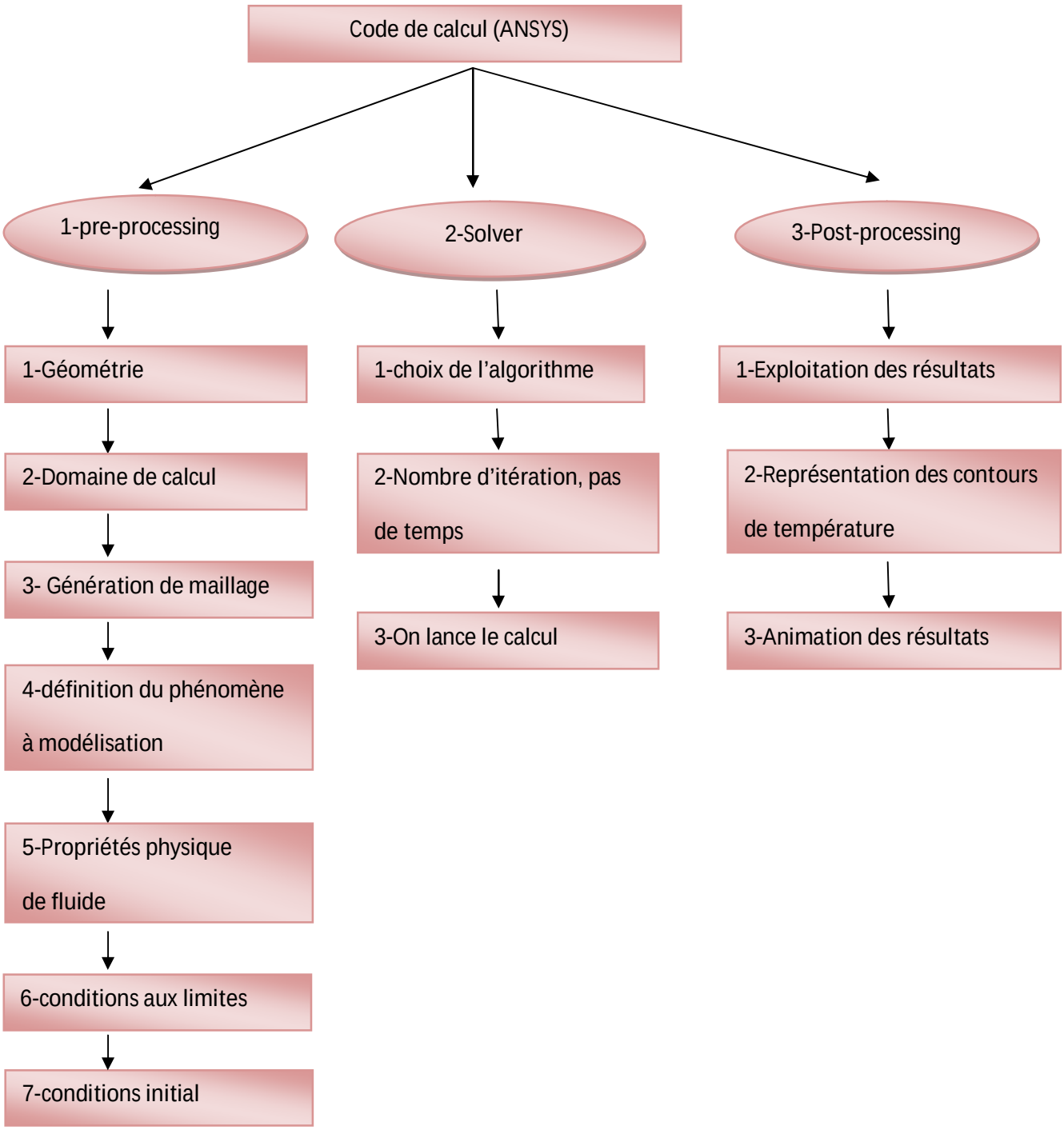


Figure IV-1 : schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV **-4.Matériaux utilisés :**

Dans cette étude numérique nous sommes intéressés à des particules d'aluminium fondues dans un jet plasma et projetées sur un substrat d'acier, le choix de l'aluminium a été orienté par des nombreuses études déjà menées.

Sur substrat métallique, la composition et l'épaisseur de la couche d'oxyde qui croit en surface et dont la croissance progresse avec la température de préchauffage du substrat, joue un rôle important dans le processus de formation des lamelles. Afin d'étudier l'effet des différents types d'oxydes

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 1,09.106 j/kg.
- une bonne résistivité électrique >1012 Ohm **[87**,**88]**
- une dureté HV sous une charge de 1N de 9,21 GPa **[87**,**88]**
- une bonne résistance à l'usure : un dépôt d'aluminium par projection plasma présente un taux d'usure de l'ordre de 4.10 – 5mm3/Nm, à l'abrasion par une bille de Sic de 6mm de diamètre et sous une charge de 5 N à température ambiante ce taux d'usure augmente jusqu'à 3.10-3 mm3 /Nm lorsque la température augmente à 400OC **[87**,**88]**
- 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. **[87,88]**
- les applications réfractaires, résistances aux hautes températures ; l'aluminium sert à protéger l'acier contre la corrosion a haute températures. **[87,88]**
- les applications médicales ; le caractère biocompatible de l'aluminium permet son utilisation dans la fabrication des prothèses en orthopédie **[87,88]**
- les applications électriques et électroniques : l'aluminium est utilisé 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. **[87,88]**

Pour l'aluminium

$\rho=2.79.10^{3}[1-4.22.10^{-5}(T-T_{f})]$ **(IV.1) [89,90]**

$\mu=2.87\ 10^{-9}\text{Texp}\ (2.05.10^{4}/T)$ **(IV.2) [89,90]**

Pour l'acier

ρ=0.9246.10^{4}-1.481T + 1.425(T/100)² (**IV.1) [89,90]**

μ=0.3162.10^{-3}exp (5.004.10^{3}/T) (**IV.2) [89,90]**

Le tableau Suivent récapitule les prospérités des mâtereaux utilisé dans la simulation :

Propriétés	Particule : Alumine	Substrat : Acier H13	Couche d'oxydation Fe_2O_3
Densité (Kg/m³)	température 2570	température 7800	5240
Viscosité (liquide) (m²/s)	°c 0 10^{5} 700 1.0345*10^{-3}		
Conductivité thermique (W/m K)	70	26	2.9
Chaleur spécifique liquide (J/Kg K)	1000		670
Conductivité thermique solide (W/mK)	°c 400 144 500 147 630 70		
Chaleur spécifique (J/Kg K)	°c 100 400 300 500 400 800 570 1050 580 1038	°c 20 460 200 502 500 550	

Tableau IV-1 : Les prospérités des mâtereaux utilisés

IV-5.Identification

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

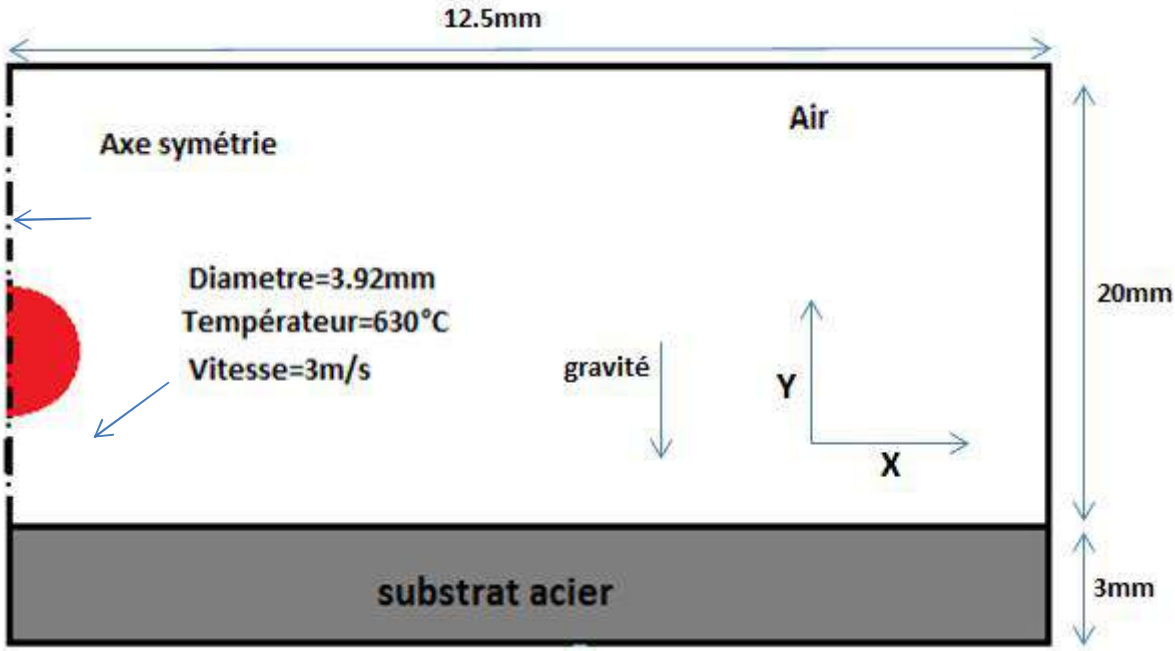


Figure* IV-2*: *configuration géométrique et conditions d'étalement pour l'identification*

- **impact d'une particule d'aluminium totalement fondue :**

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

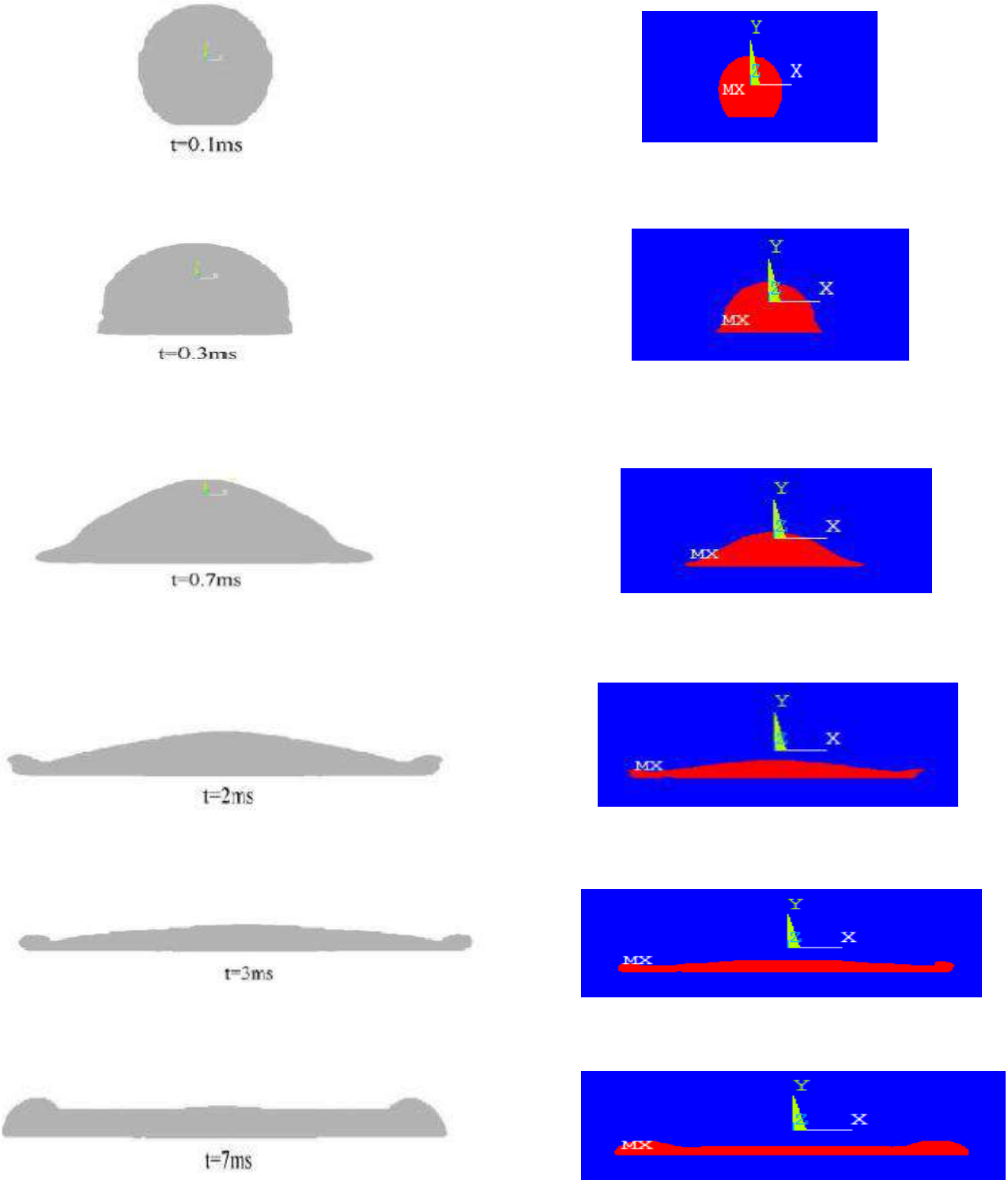


Figure IV-3 : *impact séquentiel d'une particule d'aluminium de 3.92mm de diamètre avec une vitesse initiale 3m/s et une température de 630°C sur un substrat en acier initialement.*

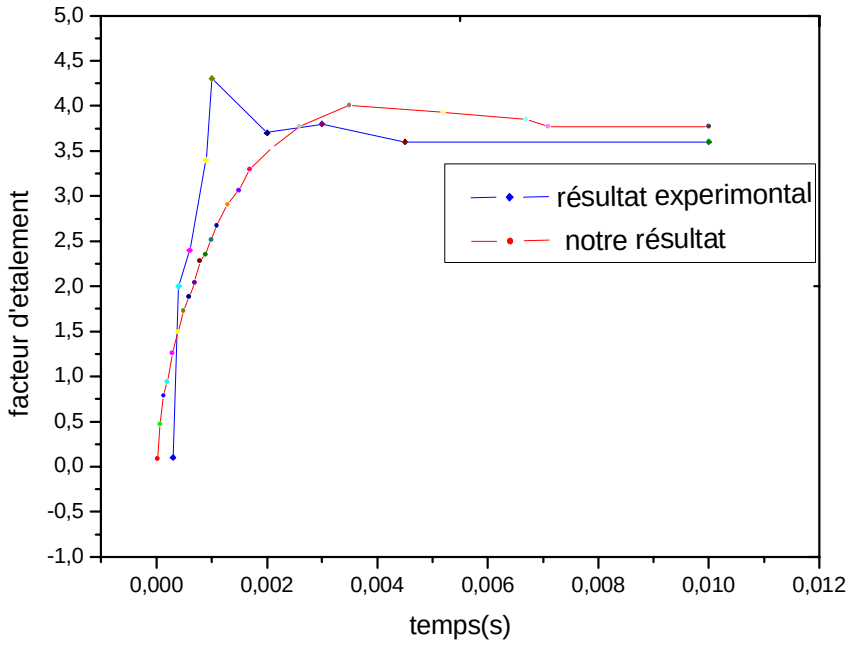


Figure IV-4: *comparaison entre les facteurs d'étalement dans les mêmes conditions.*

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

IV-6.Oxydation de la surface des substrats métalliques :

La formation d'une couche d'oxyde, composée principalement deFe_2O_3et à la surface du substrat d'acier été prise en compte dans cette étude de deux façons différentes en modifiant l'épaisseur de la couche

- **résistance thermique de contact additionnelle**

La formation d'une couche d'oxyde d'épaisseur e_{ox} est supposée contribuer à augmenter la résistance thermique de contact lamelle-substrat d'une quantité égale à $R_{thox}= e_{ox}/k_{ox}$ où k_{ox} est la conductivité thermique de l'oxyde formé à la surface du substrat, et e_{ox} l'épaisseur de cette couche. Que e_{ox} est de l'ordre de 0.01mm et que la conductivité thermique k_{ox} de cette couche est égale à 2,9 W/m.K, valeur faible comparée à celle de la conductivité thermique de l'acier (26 W/m.K).

Nous prenons comme valeur de la conductivité thermique de la couche d'oxyde celle de l'oxyde de fer Fe2O3qui est majoritaire dans cette couche .Ses propriétés physiques utilisées dans les calculs sont présentées dans le tableau IV.1.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Fe_2O_3	2,9	5240	670

Tableau IV-2:Propriétés physiques de Fe_2O_3 utilisé dans les calculs

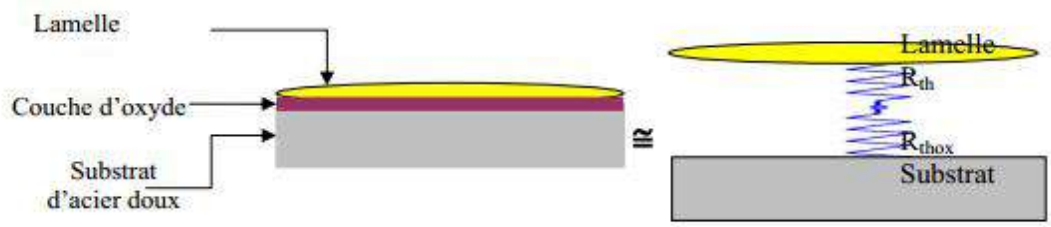


Figure IV-5: Schéma représentant le contact lamelle/substrat après l'oxydation de la Surface.

IV-6.1.Configuration et conditions d'étalement avec une couche d'oxydation :

Nous avons tenu compte dans cette partie numérique de la formation d'une couche d'oxyde constituée principalement, après préchauffage au-delà de la température de transition, de l'oxyde de fer Fe2O3 à la surface de l'acier. La couche d'oxyde en effet augmente en épaisseur lorsque les substrats sont préchauffés. Cette épaisseur est de l'ordre de 0.01 à 0.03 mm dans le cas du substrat d'acier préchauffé à 630 °c, et de l'ordre de 0.1 mm dans celui de l'acier. Nous avons introduit cette couche d'oxyde dans les calculs de solidification des lamelles d'aluminium projetées sur des substrats métalliques

Pour les calculs, nous avons fixé :

- la température initiale de la gouttelette considérant une particule d'aluminium T=630°c
- la température initiale du substrat T=200°c
- vitesse le la gouttelette 3m/s

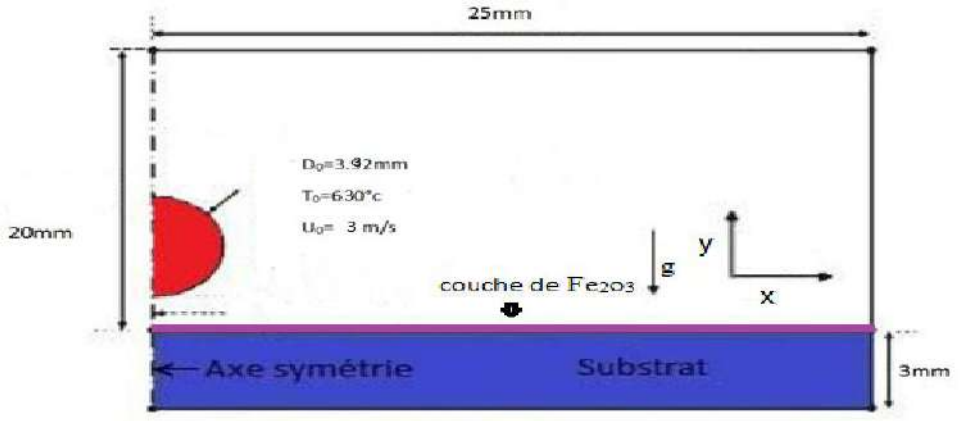


Figure IV-6 : Configuration géométrique et conditions d'étalement avec la présence d'une couche d'oxydation

IV-7.Rugosité du substrat :

La topographie du substrat conditionne l'adhérence mécanique de la goutte sur le substrat, mais affecte également la mouillabilité de la surface. En considérant une surface présentant un profil sinusoïdal idéal, représenté sur la Figure I-40, il est possible, par exemple, de montrer que la rugosité peut empêcher le proche contact entre la goutte et le substrat et affecte donc la mouillabilité de la surface

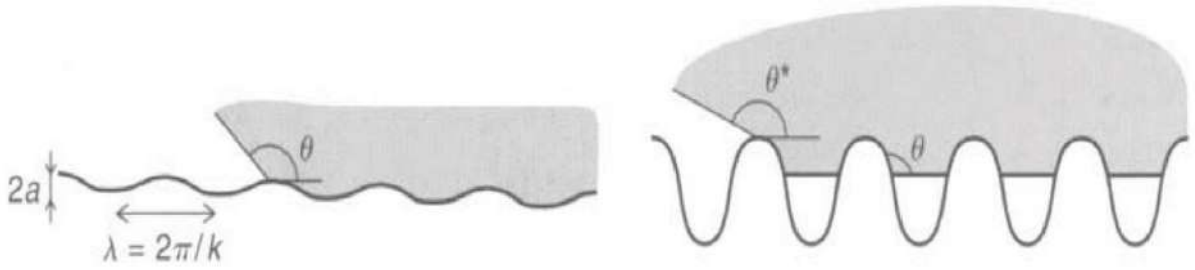


***Figure* IV-7** *: Représentation d'une surface au profil sinusoïdal idéal . Pour des faibles amplitudes, le liquide suit le profil de la surface ; mais pour des amplitudes plus élevées, des poches d'air se forment sous le liquide.*

La rugosité peut être définie en 2 dimensions, sur la ligne de profil d'une surface ; ou en 3 dimensions pour la surface dans son entier. En 2D, les deux paramètres les plus utilisés sont définis sur une longueur de base :

- Rz, représenté sur la Figure IV-8**,** correspond à la hauteur maximale du profil, soit la somme du pic le plus haut avec la vallée la plus basse ;

-Ra, représente la moyenne arithmétique des hauteurs des pics et des vallées d'un profil.

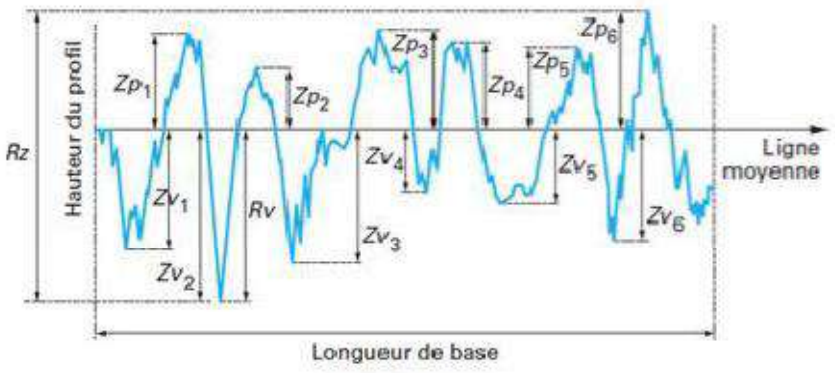


Figure* IV-8 *: *Représentation de Rz sur un profil de surface.*

Les paramètres correspondant à Ra et Rz sont en 3D, Sa et Sz. Ils représentent, respectivement la moyenne arithmétique des hauteurs des pics et des vallées d'une surface, et le pic le plus haut de la surface.

IV-8.Description du domaine d'application :

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact et l'étalement de deux particule en aluminium sur un mauvaise adhésiondes particules d'aluminium avec un substrat oxydé avec le présence de champ magnétique.

IV-8.1l'expérience :

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact et comparée l'influence de diamètre des pics sur l'étalement de deux particules en aluminium sur un substrat oxydé avec des déférente taille des pics

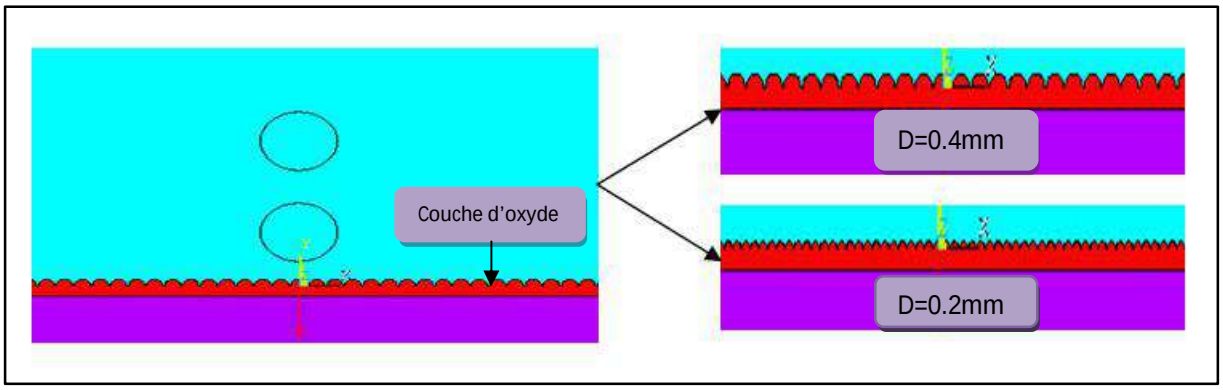


Figure IV-A.1 : *configuration géométrique de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92 mm de diamètre sur un substrat de 200°C avec d=0. 2mm et d=0. 4mm*

L'impact successif des deux particules d'aluminium sur un substrat oxydé comporte des Rugosité avec un diamètre de 0.2 mm

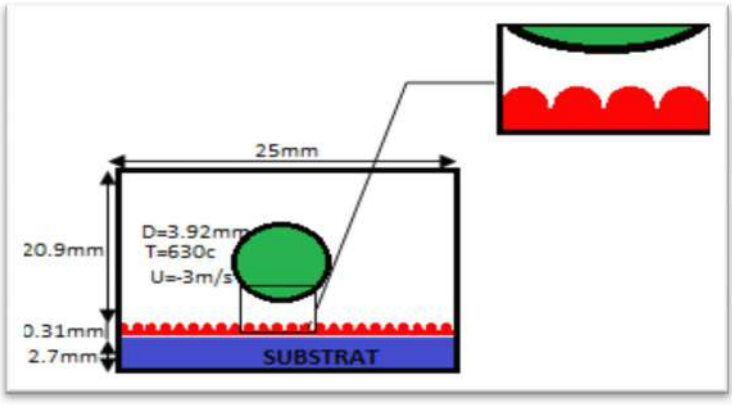


Figure IV--A.2 : *configuration géométrique de l'impact de deux gouttes d'aluminium de 3.92mm de diamètre sur un substrat de 200°C avec d=0.2mm.*

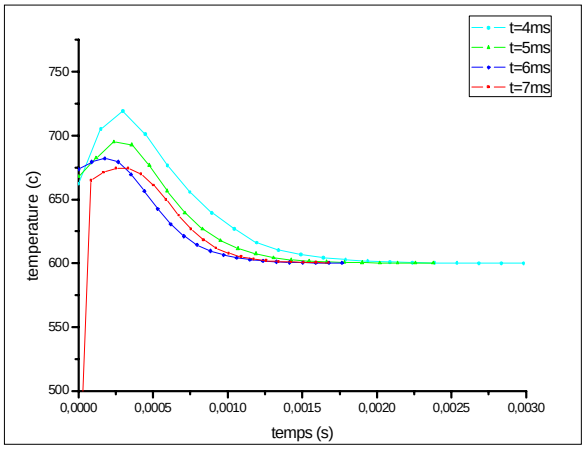


Figure IV-A.3 : *profile de température séquentielle dans le temps pour D=0.2mm*

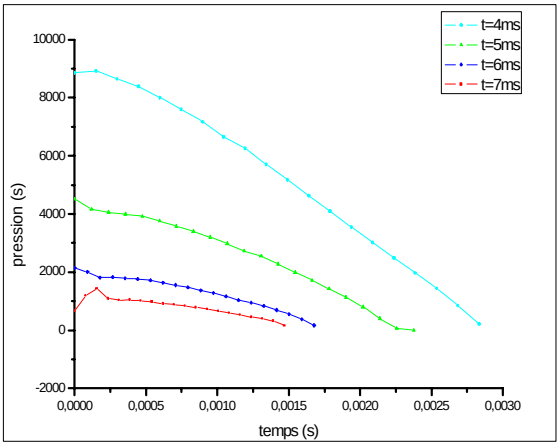


Figure IV-A.4 : *profile de pression séquentielle dans le temps* pour D=0.2mm

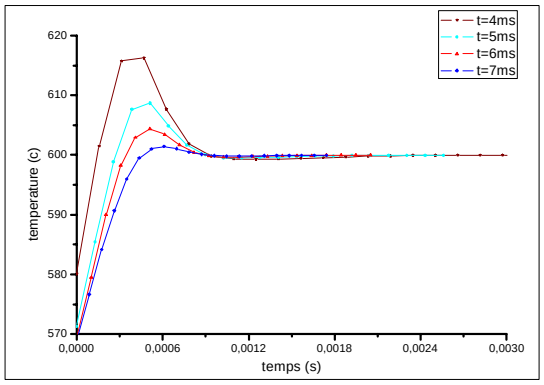


Figure IV-A.5 : *profile de température séquentielle dans le temps pour D=0.4mm*

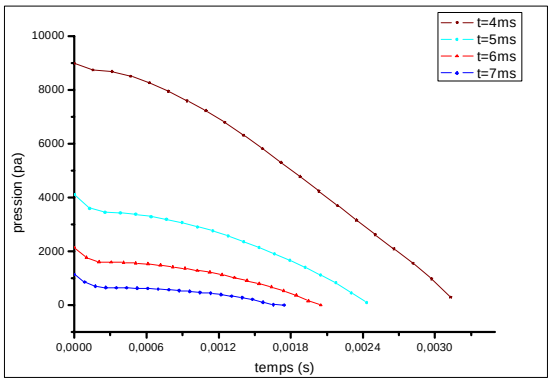


Figure IV-A.6 : *profile de pression séquentielle dans le temps pour D=0.4mm*

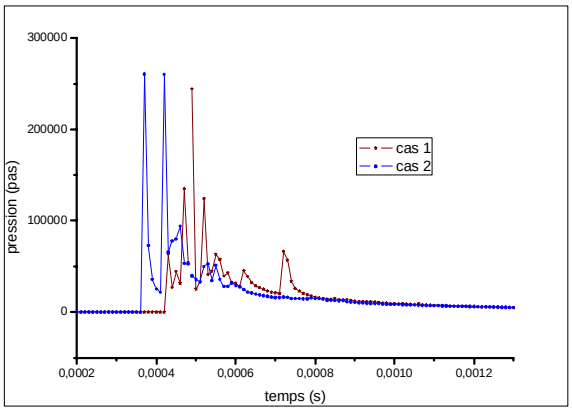


Figure IV-A.7: *la variation de pression d'impact à l'interface Particule / substrat, dans le temps* pour D=0. 2mm

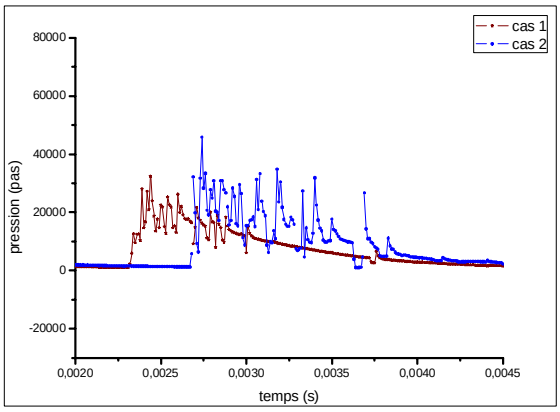
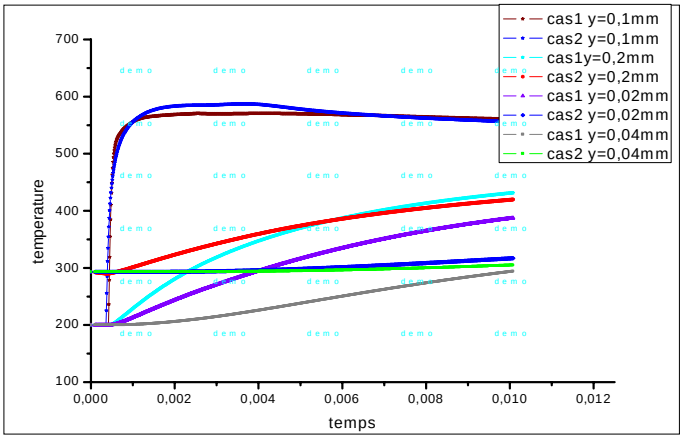


Figure IV-A.8 : *la variation de pression d'impact à l'interface Particule / particule, dans le temps* pour D=0. 2mm



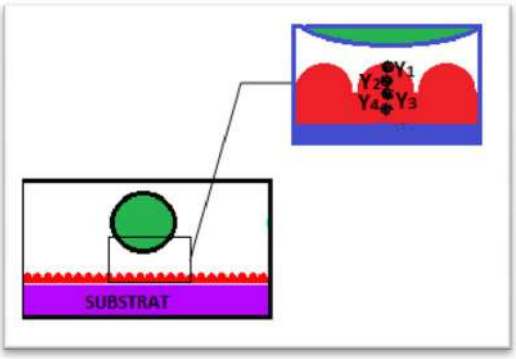


Figure V-A.9 *: profiles de température en fonction de temps pour quatre positions Au long de substrats verticalement* pour les deux cas.

L'influence de La topographie du substrat sur l'étalement de la goutte sur le substrat :

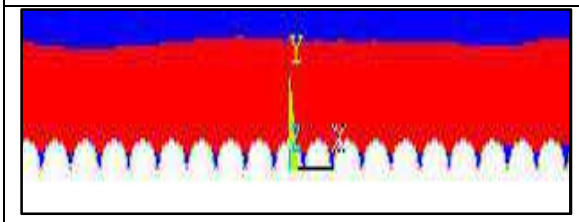
Essai 1 : D=0.2mm	**Essai 2 : D=0.4mm**
	

Tableau IV-3 : *L'influence de La topographie du substrat sur l'étalement des gouttes des deux cas.*

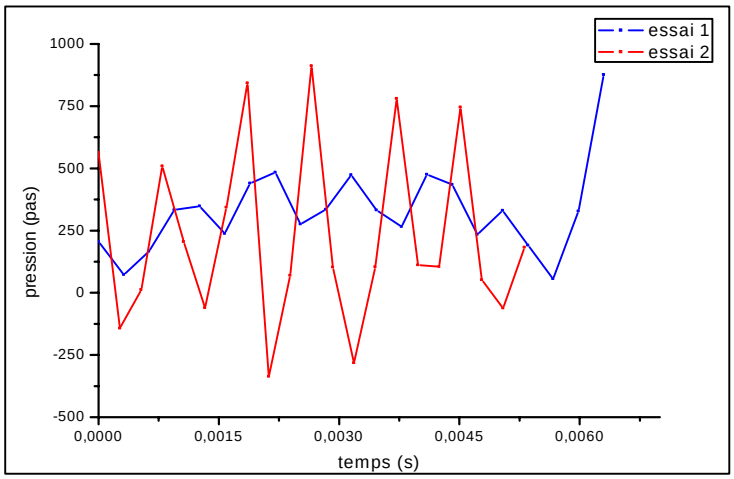


Figure IV-A.10 : *profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps.*

Apres l'impact de la goutte sur le substrat, il y a toujours une variation de pression le long du l'interface du substrat, les figure **IV-A.7 et IV-A.8** Représente la variation de la pression d'impact

des deux particules au fil de temps, et montre que la particule permet une bonne adhérence de lamelle sur substrat oxydé et engendre une pression élevé nécessaire et suffisante pour un bon accrochage mécanique, principalement sur le premier point d'impact particule-substrat, avec le temps cette pression se minimise. Et augment encore comme la deuxième particule impact sur la première mais avec une base pression que le premier impact et cella dus à la viscosité et l'élasticité des deux particules.

La figure **IV-A.9** montre les zones de bonnes et mauvaise contacte à l'interface particule/substrat. D'après cette figure on observe le profil de température pour quatre positions dans le substrat. On note que la température de substrat augment pour les quatre positions dans les deux cas dont la vitesse de refroidissement dans le deuxième cas on à un retard par rapport a le premier qui provoque l'éclaboussement de particule.

Le Tableau**IV-3** : Montre L'influence de la topographie du substrat sur l'étalement des gouttes pour D=0.2mm et D=0.4mm dans le premier cas l'étalement et presque parfait et les vide sont rempli ce qui montre un bon accrochage mécanique mais dans le deuxième cas en remarque un éclaboussement de l'aluminium alors la rugosité peut empêcher le proche contact entre la goutte et le substrat et affecte donc la mouillabilité de la surface. Aussi en note que la forme de remplissage des vide et concave dans les deux cas se qui est favorable pour un bon accrochage

La Figure **IV-A.10:** représente l'allure de pression au long de l'interface du substrat, pour montre les zone de l'accrochage et décrochage, dans cette expérience en compare deux essai quand le diamètre des pics est 0.2 mm et 0.4mm ; les pics base montre le décrochage des particules d'aluminium sur le substrat et les pics haut montre l'accrochage sur le substrat.

Les figure de température séquentiel pour les deux cas montre que la vitesse de refroidissement de deuxième cas et inferieur au premier cas ce qui provoque un éclaboussement de particule alors le diamètre des pics influence sur l'étalement de lamelle.

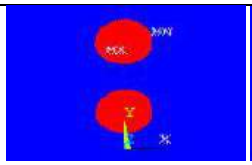
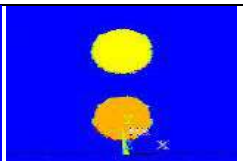
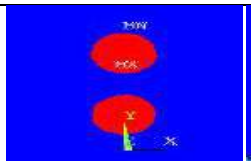
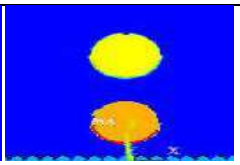
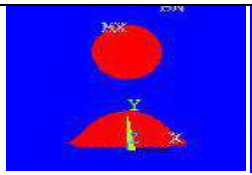
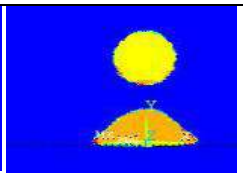
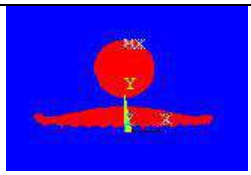
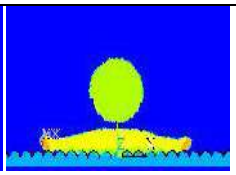
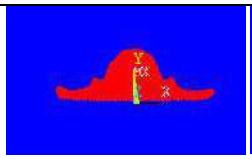
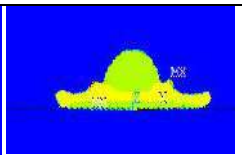
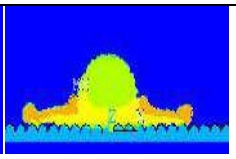
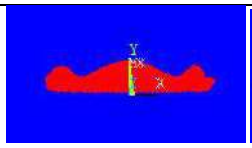
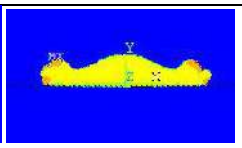
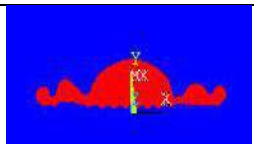
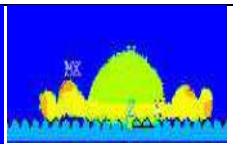
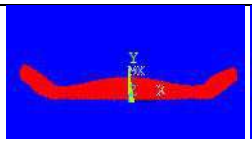
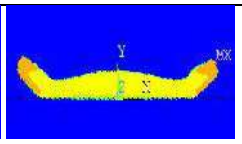
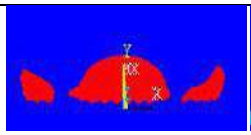
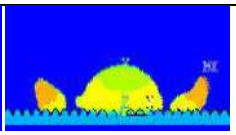
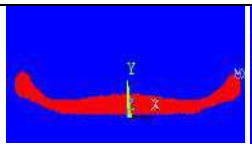
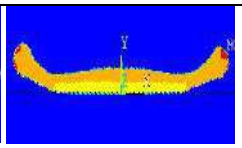
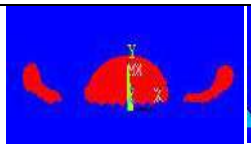
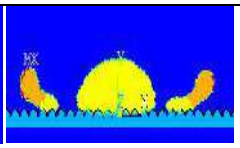
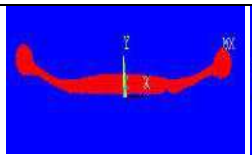
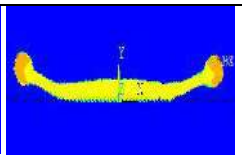
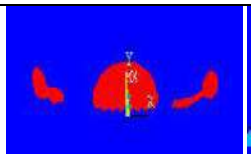
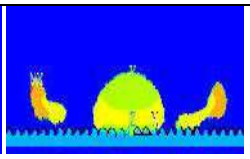
	Cas 1 : D=0.2mm		Cas 2 : D=0.4mm	
	fraction volumique	température	fraction volumique	température
T=0.01ms				
T=1ms				
T=2ms				
T=3ms				
T=4ms				
T=6ms				
T=7ms				
				

Tableau IV-4*: *les résultats de l'étalement des goute de la premier expérience

Les figures dans le tableau IV-4, représente la distribution de température pendant l'impact des deux gouttes initialement à une température de 630°C sur un substrat d'acier à 200°C. Où le modèle de transfert thermique utiliséa permis d'observé que les extrémités de lamelle enregistre un retard de refroidissement et de solidification , L'augmentation de la taille des pics à favorisé la diffusion thermique transversale qui à provoqué l'eclaboussemt dans le deuxiem cas .

IV-8.1.1.Conclusion partielle :

Cet étude en vous conclusion plusieurs point et les caractéristique important qui influencé sur l'étalement et la solidification, refroidissement de gouttelette d'aluminium sur un surface de substrat d'acier oxydée, ainsi que la pression d'impact de la particule est liée à l'adhérence au substrat, cependant les particules génèrent une pression relativement importante par leur temps.

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

- La pression est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle) qui produise une bonne d'adhérence entre de goutte/substrat

Alors la pression d'impact des particules est liée à l'adhérence à la paroi, et la pression est influencée par le diamètre des pics.

- la température est plus élevée au point d'impact (sous la lamelle), elle est influencée par le diamètre des pics.
- La formation de lamelle dans le premier cas de D=0.2mm est bien étalée, donc le diamètre des pics joue un rôle important sur la formation de lamelle.

Donc pour évité l'éclaboussement des particules sur le substrat (D=0.4mm) en essaye d'ajoute un champ magnétique sous le substrat et observé les effets sur l'accrochage des particules sur le substrat et l'étalement de ces particules

IV-8.2 les essai

Dans cette étude nous proposons de simulé et d'étudier le refroidissement et la dynamique de l'impact et comparée l'influence de champ magnétique sur l'étalement de deux particules en aluminium sur un substrat oxydé avec des déférente valeur de champ magnétique

IV-8.2 .1 la première essai :

En essay avec le valeur (-500)

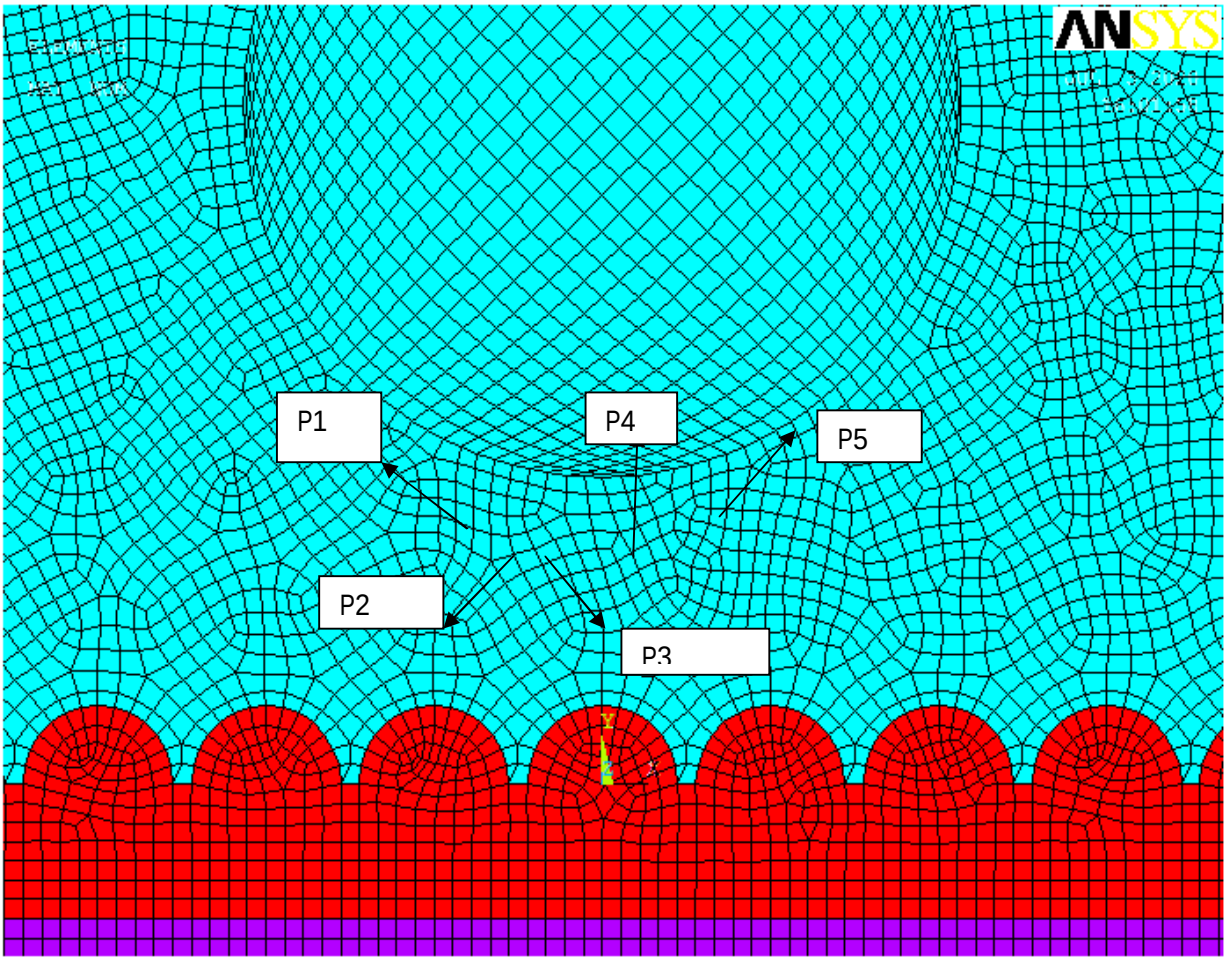
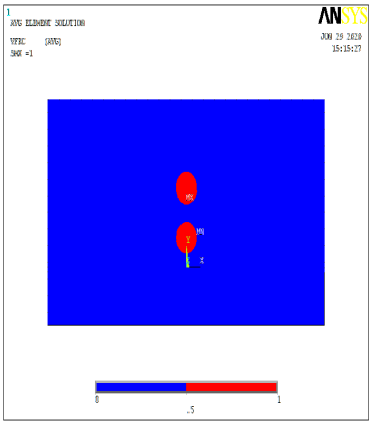
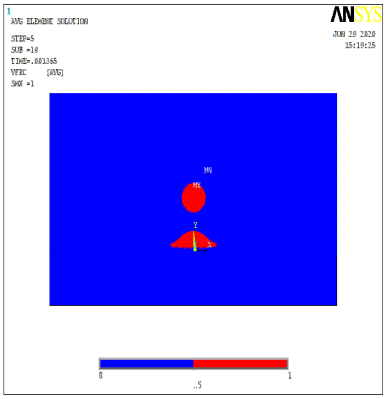
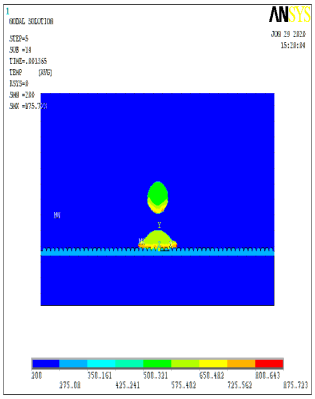
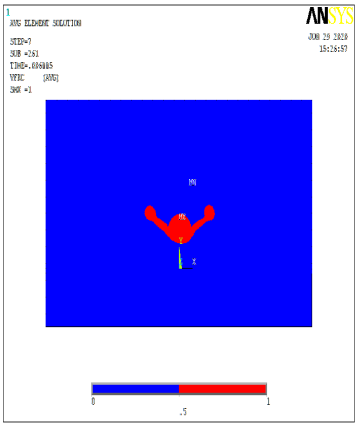
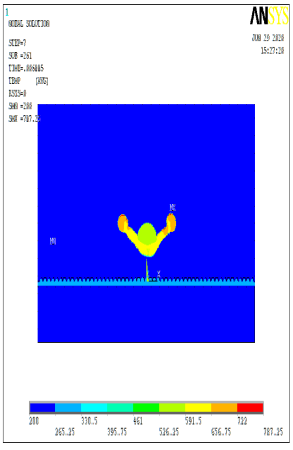


Figure IV--A: *configuration géométrique d' un substrat de 200°C avec d=0.4mm*

temps	**fraction volumique**	**température**
T1		
T2		
T3		

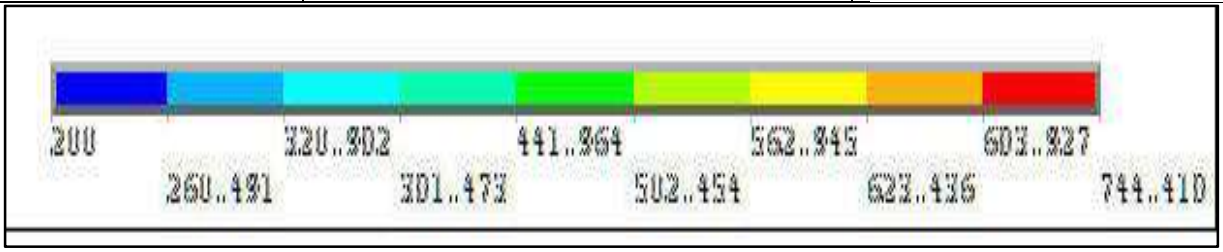


***Tableau IV-5**: les résultats de l'étalement des goute de la premier expérience*

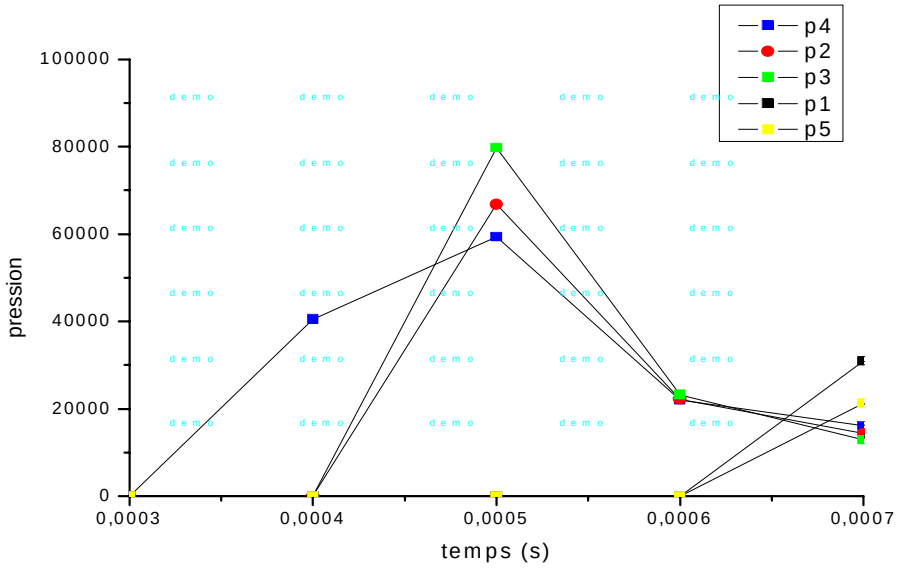


Figure IV-A.11 : *profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps*

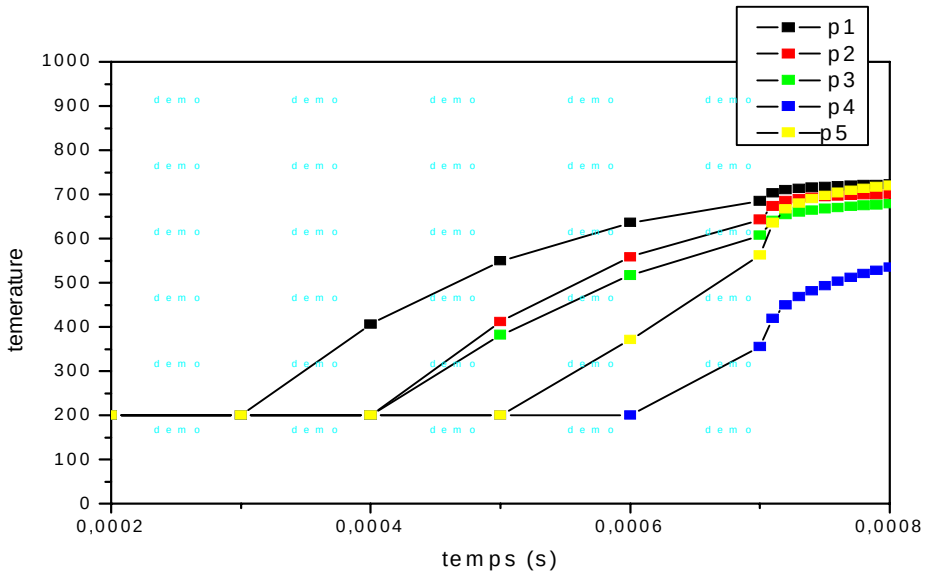


Figure IV-A.12 : *profile de température séquentielle au long du substrat dans le temps*

Les figures dans le ***Tableau IV-4***représente la distribution de température pendant l'impact des deux gouttes initialement à une température de 630°C sur un substrat d'acier à 200°C. Où le modèle de transfert thermique utiliséa permis d'observé que il ya aucun accrouchage ou contact entre le particule daluminium et le substrat

Dapres la***Figure IV-A.11***représente l'allure de pression au long de l'interface du substrat.
L'augmentation de pression sur les point d'impact son l'adhérence des particules sur le substrat exprime que il ya une force dans le sense opposé

Figure IV-A.12représente l'allure de température au long de l'interface du substrat

IV-8.2.2.Conclusion partielle :

Cet étude en vous conclusion plusieurs point entre la relation entre la direction de champ magnétiques et le sense de particules

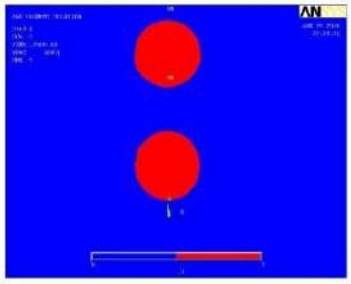
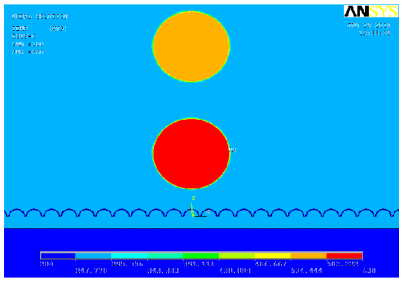
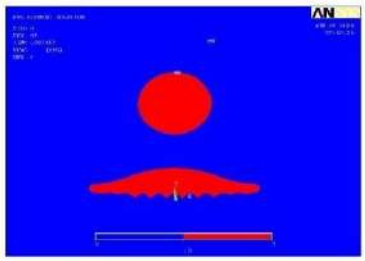
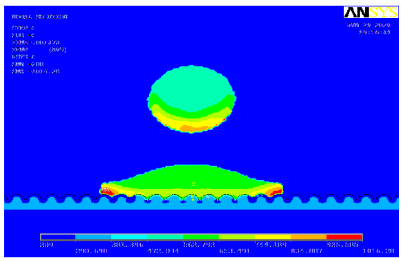
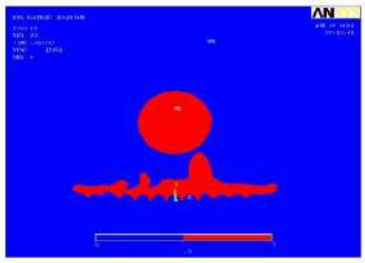
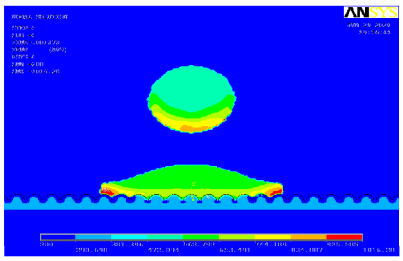
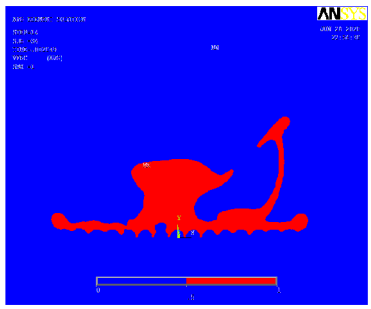
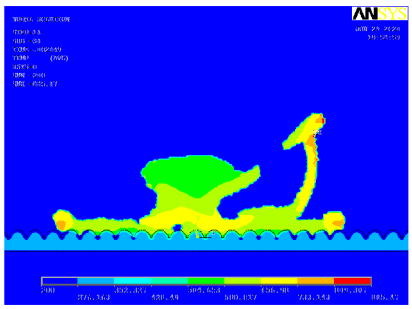
Apres l'analyse de résultat de simulation ou peut conclure :

- Si le champ magnétiques dans le sense oppose il empêché l'accrochage des particules et le substrat

IV-8.2 .1 la deuxième essai :

Donc en essaye avec une valeur positive (+500)

(champ magnétique a la même direction avec la gravité)

Temps	**fraction volumique**	**température**
T1		
T2		
T3		
T4		

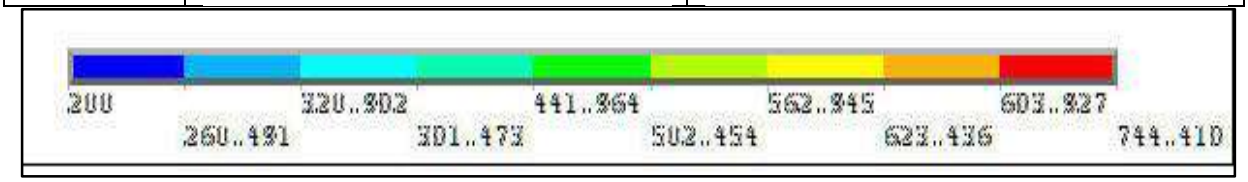


Tableau IV6*: *les résultats de l'étalement des goute de la deuxièmes expérience

Tableau IV-5:: représente la distribution de température pendant l'impact des deux gouttes initialement à une température de 630°C dont l'une et partiellement fondue avec des diamètres déférent impactant sur un substrat d'acier à 200°C. Où le modèle de transfert thermique utiliséa permis d'observé que les extrémités de lamelle enregistre un retard de refroidissement et de solidification,et perturbation de la dexieme particules d'alminium par l'effet de la champ magnetique et la forme de l'impact

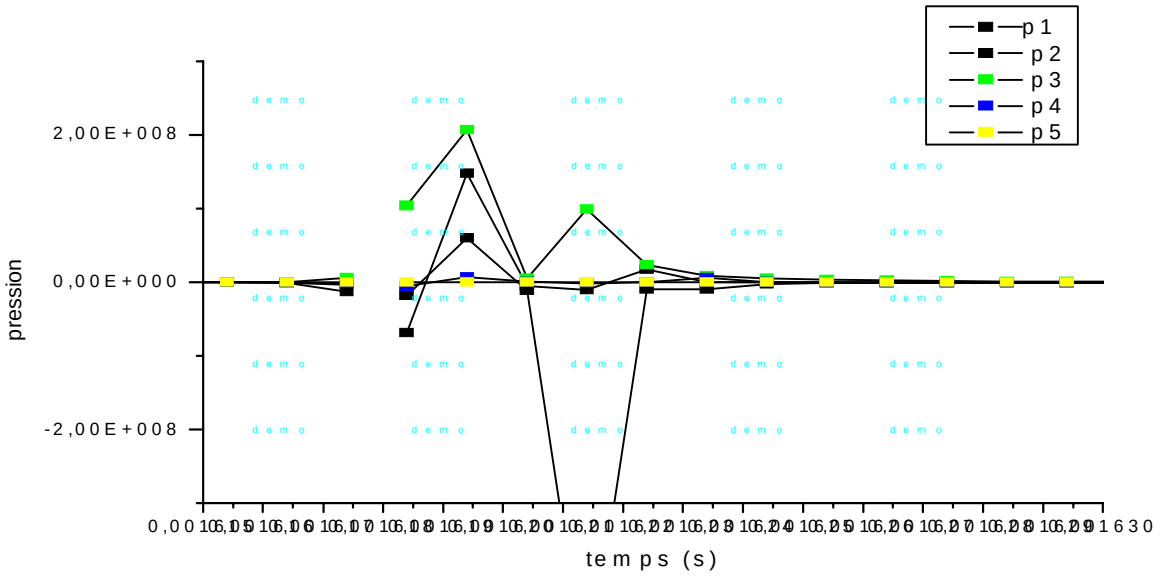


Figure IV-A.13: *profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps*

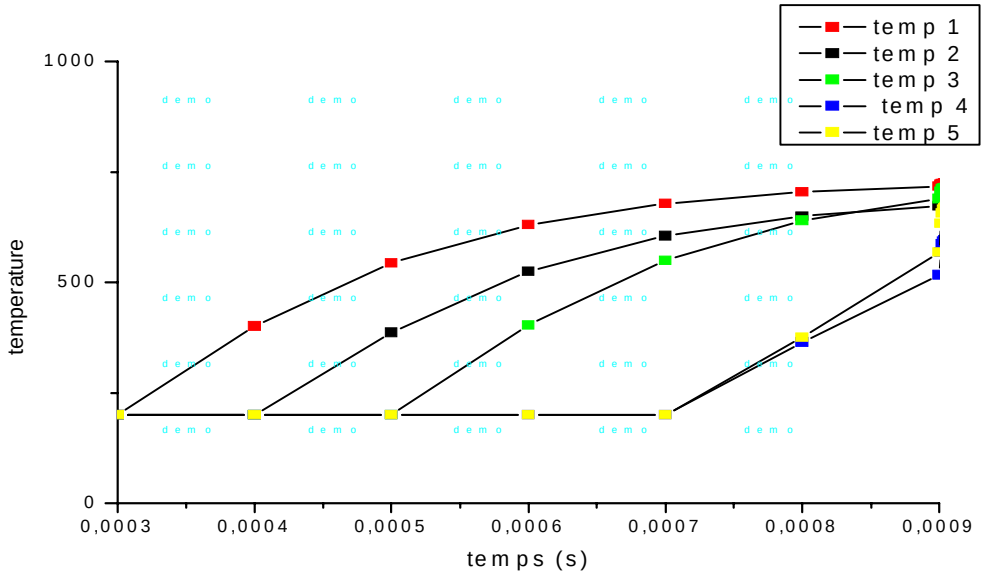


Figure IV-A.14 : *profile de température séquentielle au long du substrat dans le temps*

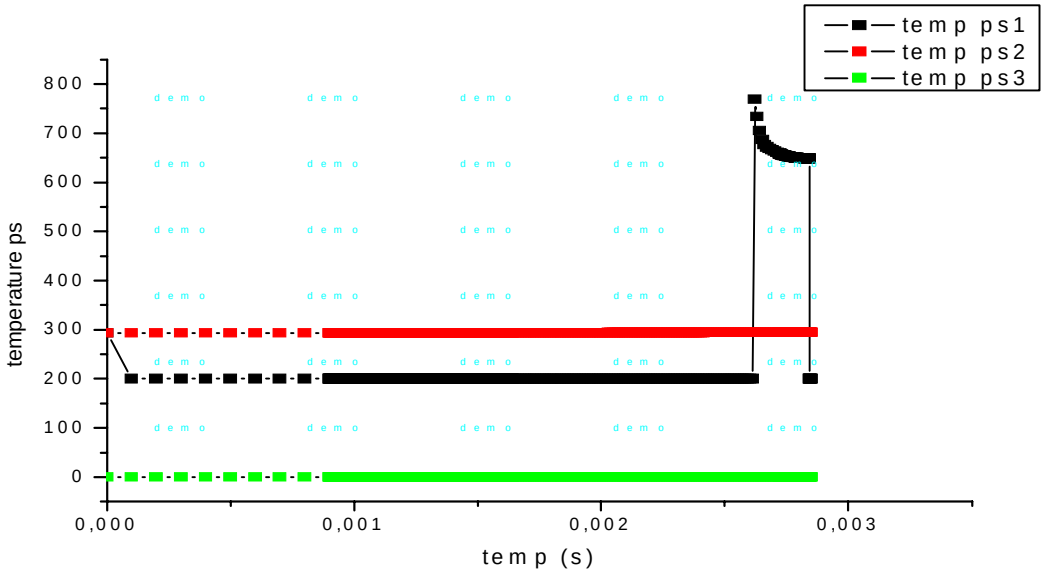


Figure IV-A.15 : *profile de température séquentielle aux pics dans le temps*

La ***Figure IV-A.6*** : représente la variation de la pression au long de la substrat dans le temps et montre que la première particule permet une bonne adhérence de lamelle sur substrat oxydé et engendre une pression élevé nécessaire et suffisante pour un bon accrochage mécanique, principalement sur le premier point d'impact particule-substrat, avec le temps cette pression se minimise. Et augment encore comme la deuxième particule impact mais avec une base pression que le premier impact et cella dus à la viscosité et l'élasticité des deux particules.

On observe aussi le point **p2**est soumis des pression en continue et progressivement et qu'a provoque instabilité de l'étalement

La ***Figure IV-A.13 :*** représente la variation de la température au long de la substrat dans le temps.. On note que la température de substrat augmente et le premier point qui augmenter sa température c'est le point d'impacte

La ***Figure IV-A.14 :*** représente le profile de température séquentielle au l'impact dans le temps ,on observe que le point (ps3) reste toujours constant par l'effet de refroidissement

IV-8.2 .2 la troisième essai :

Dans cette études on proposons de augmente la valeur de champ magnétique pour observe une bien étalement

En essayez le valeur (1000)

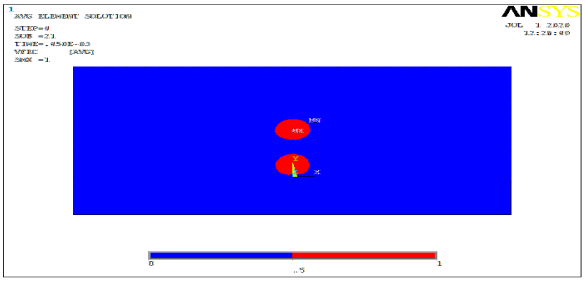
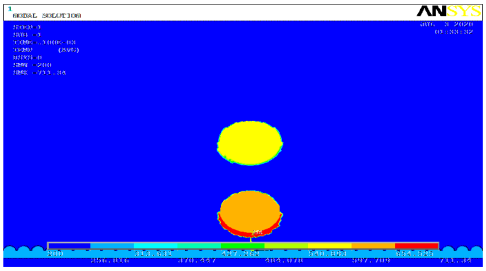
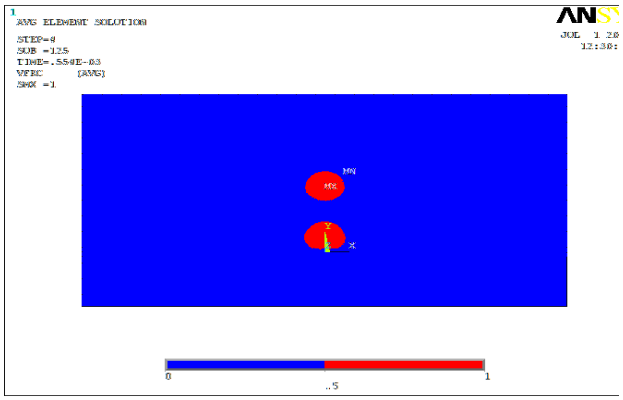
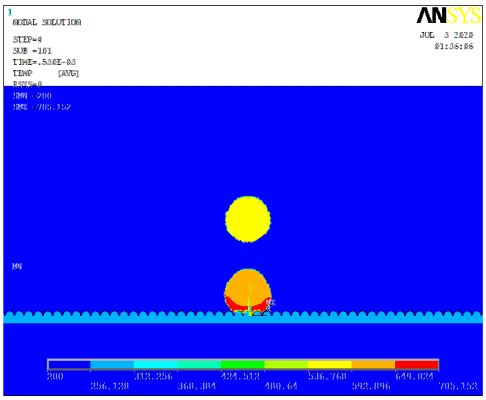
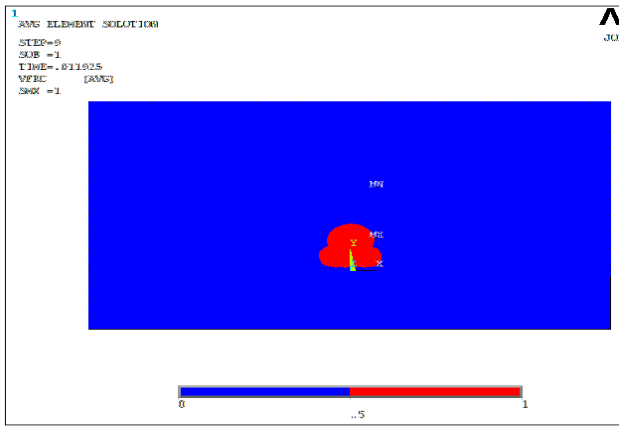
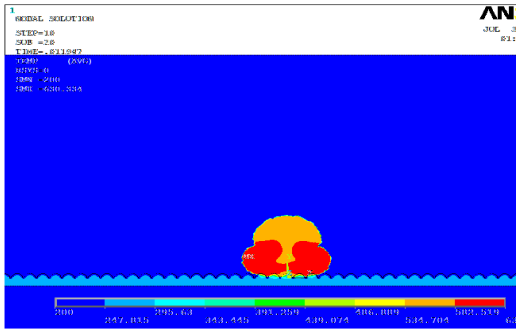
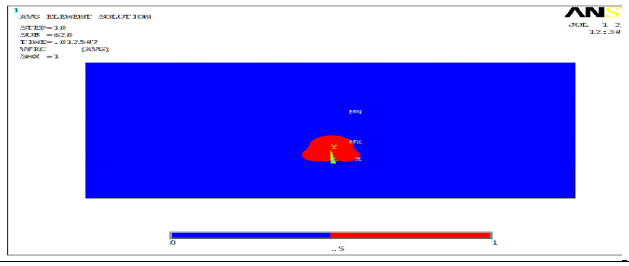
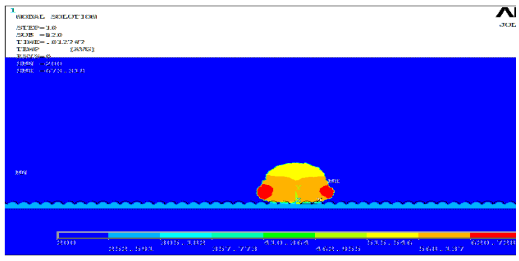
Temps	**fraction volumique**	
T1		
T2		
T3		
T4		

Tableau IV7*: *les résultats de l'étalement des goute de la troisième expérience

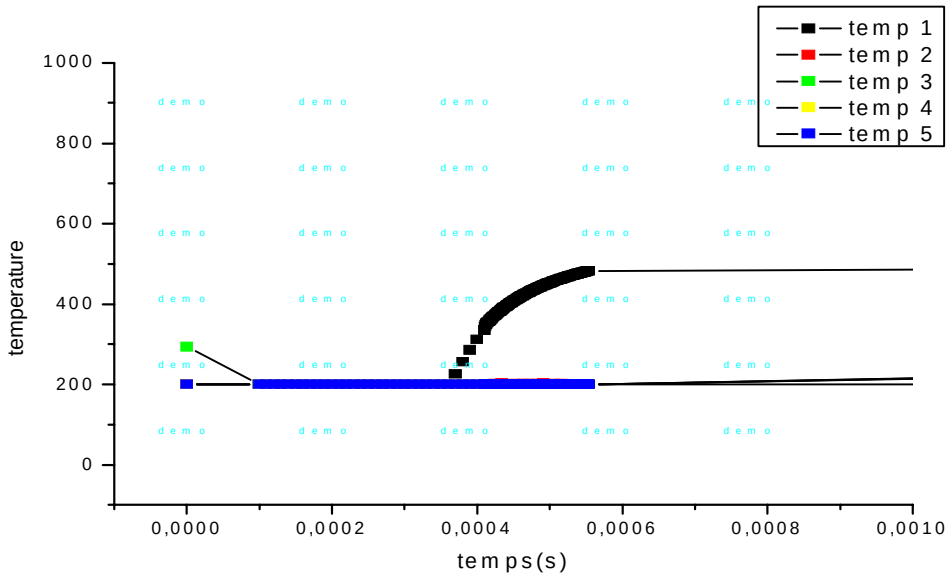


Figure IV-A.16: *profile de température séquentielle au long du substrat dans le temps*

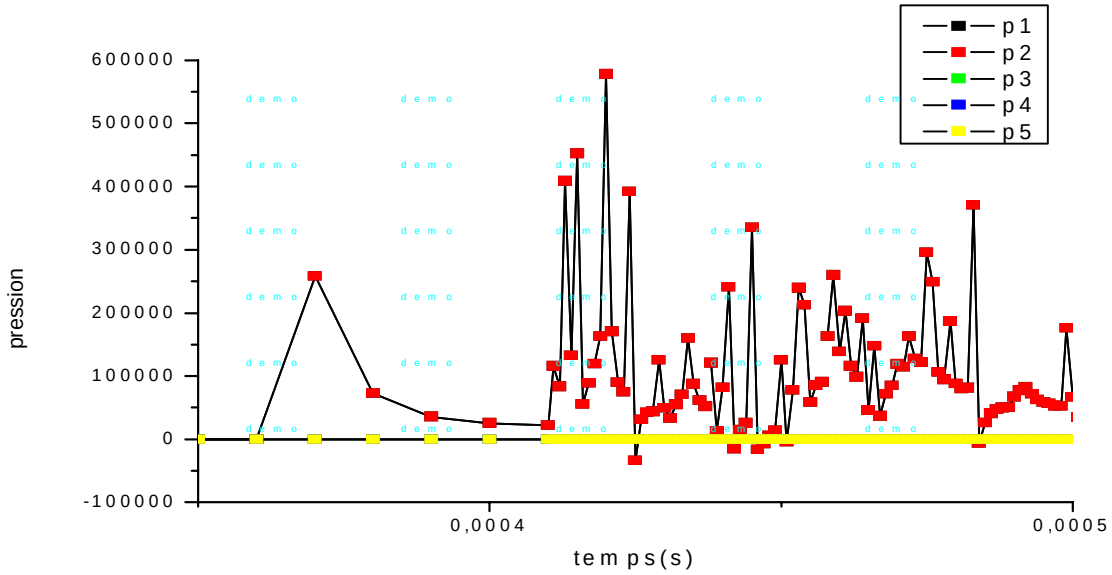


Figure IV-A.17 : *profile de pressionséquentielle au long du substrat dans le temps*

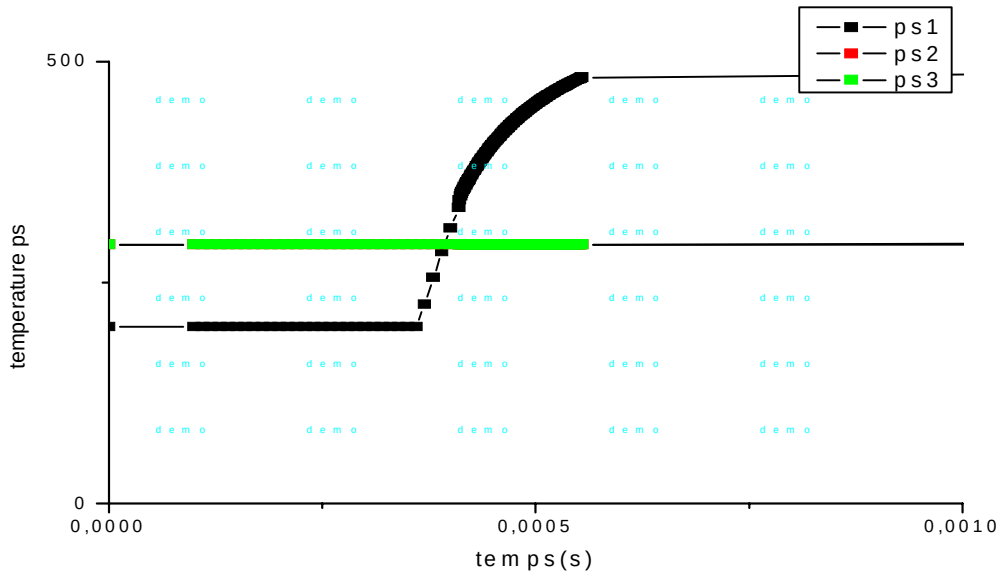


Figure IV-A.18 : *profile de température séquentielle aux pics dans le temps*

Le ***Tableau IV8:*** représente la distribution de température pendant l'impact des deux gouttes initialement à une température de 630°C dont l'une et partiellement fondue avec des diamètres déférent impactant sur un substrat d'acier à 200°C. Où le modèle de transfert thermique utiliséa permis d'observé que les extrémités de lamelle enregistre un refroidissement et de solidification rapide car le grande valeur de champ magnétique Empêche l'étalement de la particule d'aluminium

La ***Figure IV-A.16***: ***:*** représente la variation de la température au long de la substrat dans le temps.. On note que la température de premier point c'est le seul qui augmente ca température car il ya un accrochage mais le point **P3** et **P4** et **P5**Enregistre la même température parce que il n'ya pas une accrochage

La ***Figure IV-A.17:*** représente la variation de la pression au long de la substrat dans le temps et montre que la première particule est solidifier rapidement son étalement parce que en remarque ilya une perturbation de pression sur le point **P1** et **P2**

IV-8.2 .4 la quatrième essai :

D'apres notre essai on note que le grande valeur de champ magnétique cause le rapide solidification et le petite valeur cause des perturbation entre les deux particules ,Donc nous essayons des valeurs moyennes (850)

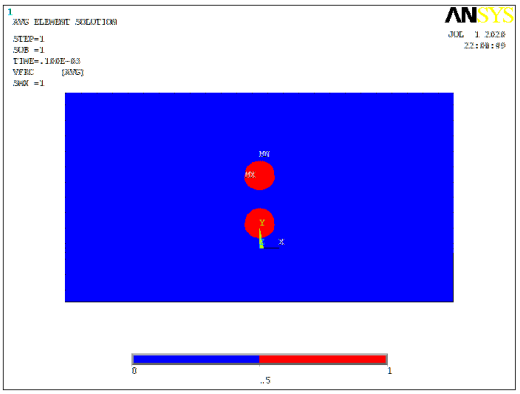
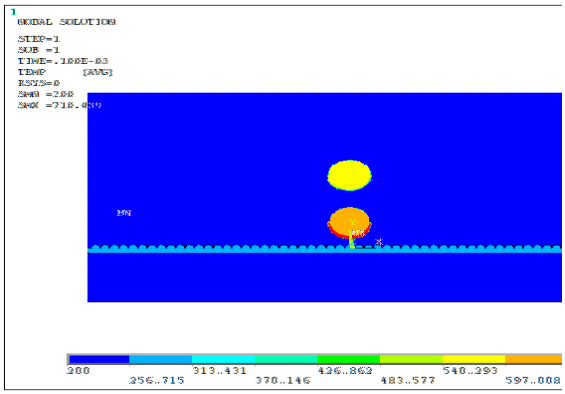
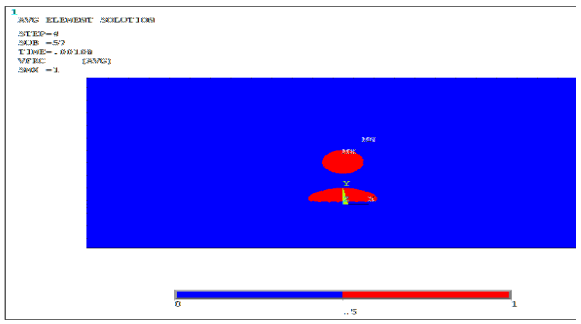
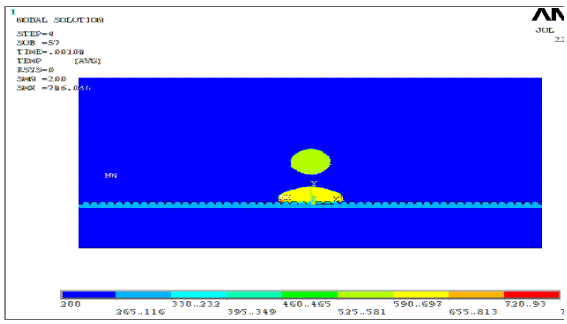
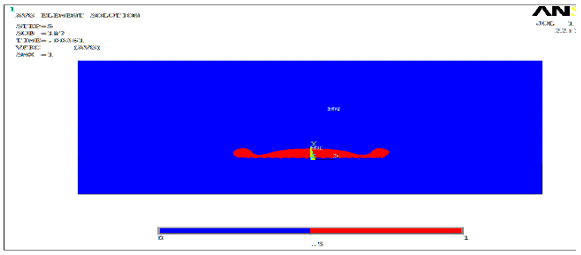
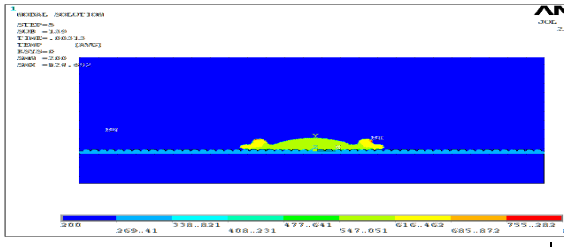
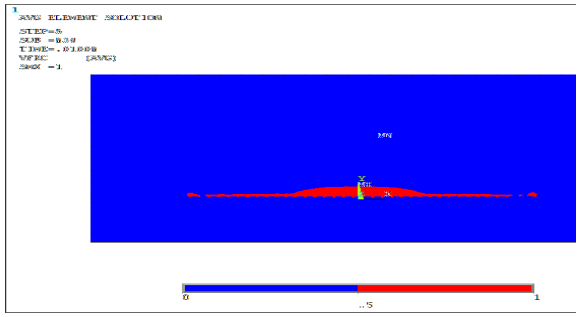
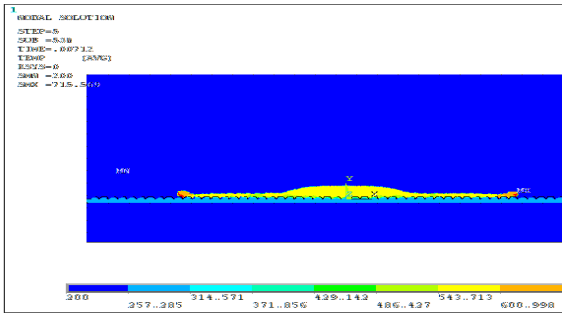
Temps	**fraction volumique**	**température**
T1		
T2		
T3		
T4		

***Tableau IV8**: les résultats de l'étalement des goute de la quatrième expérience*

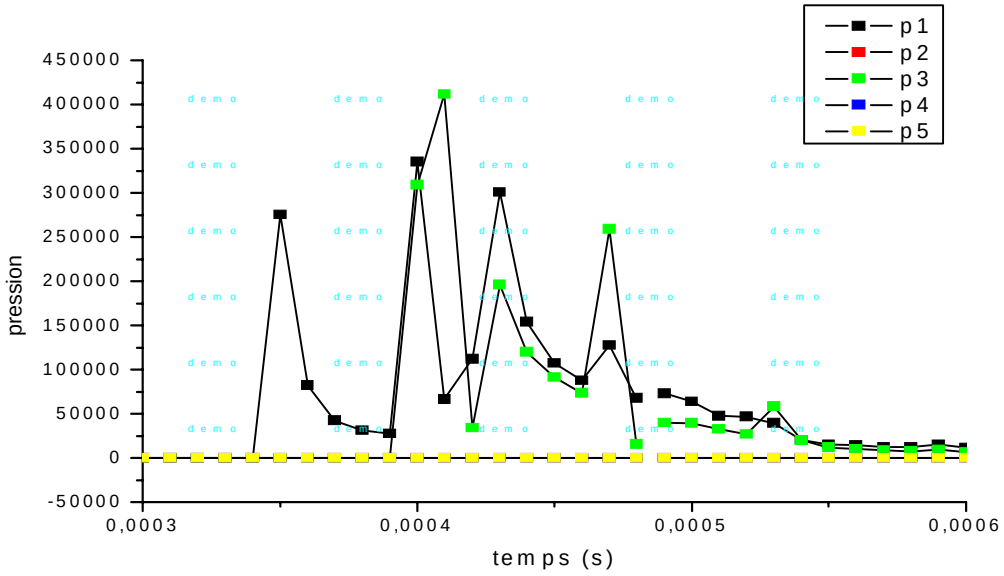


Figure IV-A.19 : *profile de pression séquentielle au long du substrat dans le temps*

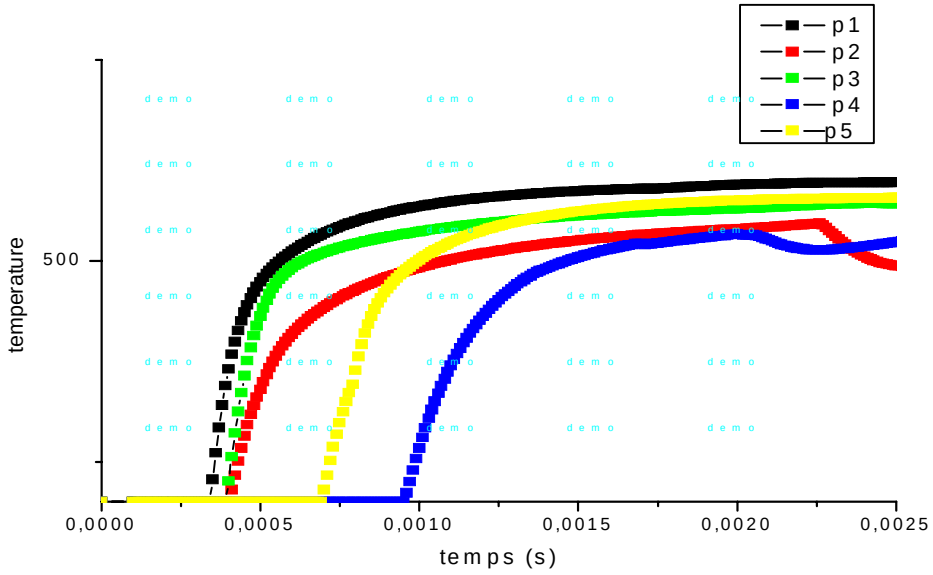


Figure IV-A.20 : *profile de temperature séquentielle au long du substrat dans le temps*

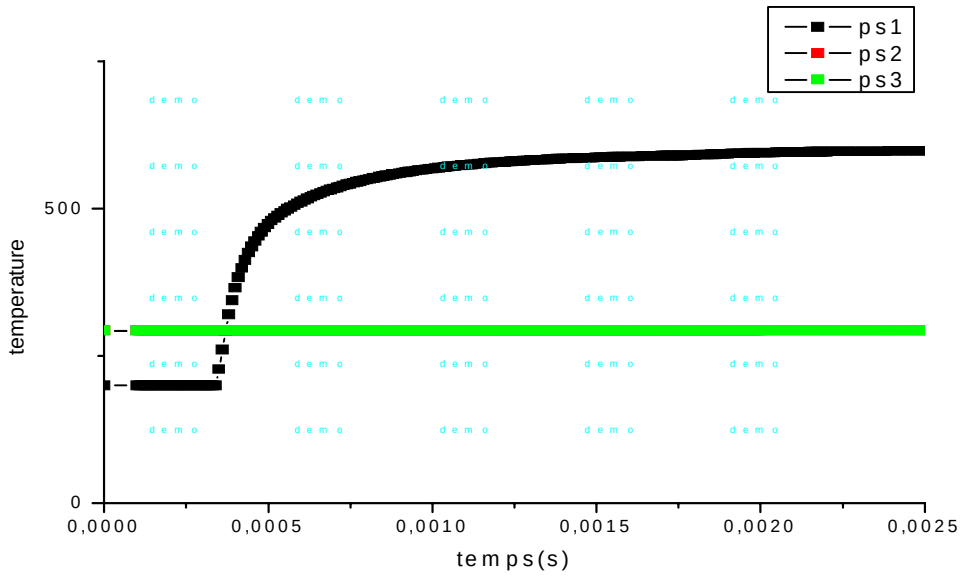


Figure IV-A.21 : *profile de température séquentielle aux pics dans le temps*

Le ***Tableau IV9 :*** représente la distribution de température pendant l'impact des deux gouttes initialement à une température de 630°C dont l'une et partiellement fondue avec des diamètres déférent impactant sur un substrat d'acier à 200°C. Où le modèle de transfert thermique utiliséa permis d'observé ilya une etalment son perturbation avec une soliification par leffet de refroidissement a lextrimite de lamele et en remarque aussi le deuxieme particule n'avez pas une complete etalment et solidifier avant l'etalment

La ***Figure IV-A.19:*** représente la variation de la pression au long de substrat dans le temps et permet de nous a observe que les pressions dans les point **P2** et **P4** est inferieur a **P1** et **P3**et **P5**

Car ces point c'est les premier point qui est en contact avec les particules d'aluminium

Figure IV-A.20 : représente la variation de température séquentielle aux pics dans le temps qui permet a nous de remarque que le point d'impact enregistre un augmentation de temperature par l'effet d'accrochage de particule et l'impact et les deux autre point garde la même valeur de temperature car Ilya une refroidissent

Apres les quatres essai en va comparer entre les .

En commence par la comparaison entre les temperature ans le point d'impact

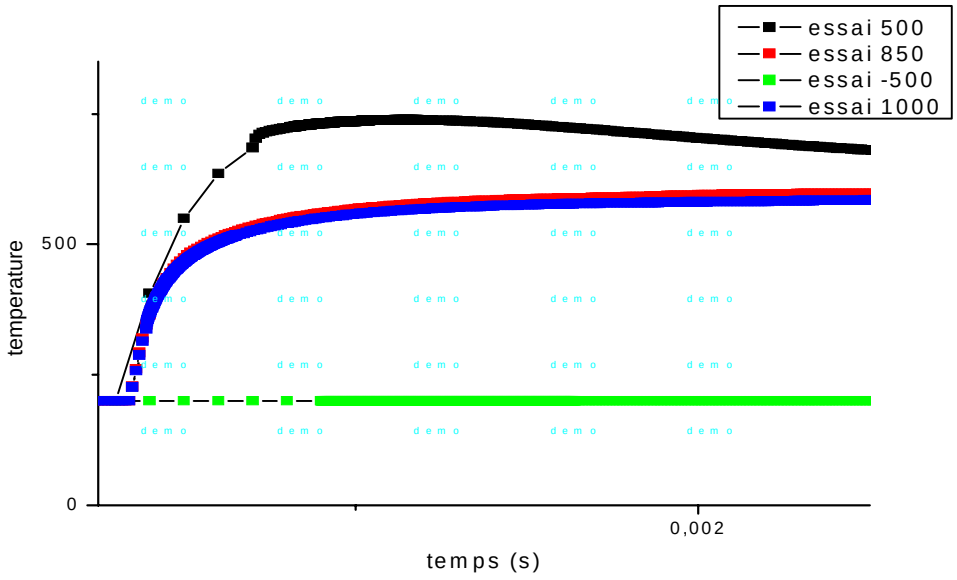


Figure IV-A.22: variation de la temperature dans point d'impact pour les touts essai

Deuxième comparaison dépend le facteur d'étalement :

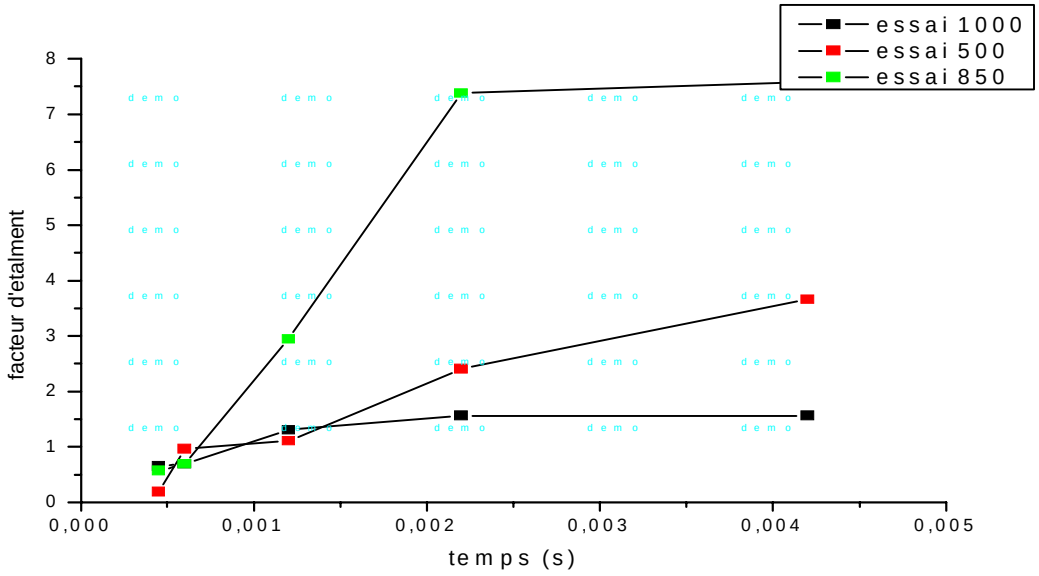


Figure IV-A.23*comparaison entre les facteurs d'étalement de trois essais*

La ***Figure IV-A.22:*** représente la variation de la temperature dans point d'impact pour les trois essai

En remarque que le point d'impact pour l'essai (-500) reste constante car il n'ya aucune accrochage puis le température de l'essai (1000)et (500) enregistre la plus grande valeur car la deuxième particule n'étalé pas donc La température est centrée dans le point d'impact

La ***Figure IV-A.23 :*** représenté la comparaison entre les facteurs d'étalement de trois essais en remarque que le facteur d'talment pour l'essai (850) c'est le plus grand valeur puis l'essai (1000) et (500)

IV-8.3..Conclusion partielle :

Ce travail s'intéresse a la projection plasma, ce dernier procède de revêtement possède une grande importance dans l'industrie, parmi les matériaux utilises dans ce possède on cite l'aluminium ; un matériau fortement utilise dans les barrières thermique, l'isolation électrique….

Pour la réalisation de ce travail on utilise principalement deux méthodes (VOF et EF).

Dans le dernier chapitreon a fait la simulation en 2D cartésien sur un cas de validation afin d'assurer le bon fonctionnement de la simulation, puis sur l'impact des particules de poudre qui s'écrasent sur le substrat, pression d'impact pour différentes états de fusion, les résultats obtenues montrent que le champ magnétique c'est pas une solution pour évité l'éclaboussement des particules si en change la géométrie de substrat Cependant, l'analyse 2D a permis de donner une idée sur les phénomènes intervenant lors de la projection plasma et aussi de donner une grandeur des dimensions de maillage à respecter ainsi que de localiser les zones ou l'on devra porter notre attention.

Conclusion général

L'écrasement de particules métalliques sur un substrat par projection, plasma en vue de la fabrication d'un revêtement dense est un procédé industriel largement utilisé. Mais les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont encore que partiellement maîtrisés car les interactions entre ces particules fluides, la solidification ainsi que la refusions éventuelle par projection de gouttes sur les précédentes sont difficiles à analyser expérimentalement à cause des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la milliseconde et du millimètre. Il est donc nécessaire de faire appel à un outil numérique complexe pour prendre en compte les divers aspects physiques de cet écrasement. Les travaux menés ont eu tous pour objectif d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes dynamiques et thermiques qui se produisent à l'échelle de gouttes. Notre travail fait partie de l'ensemble de ces travaux.

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

- La géométrie de substrat joue un rôle ans l'étalement des particules .
- le modèle de transfert thermique utilise a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retarde.
- Les températures du substrat et de la goutte sont inversement proportionnelles à cause du transfert de chaleur. .
- La présence de champ magnétique ne permet pas d'évité l'éclaboussement des particules

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

Conclusion général

L'écrasement de particules métalliques sur un substrat par projection, plasma en vue de la fabrication d'un revêtement dense est un procédé industriel largement utilisé. Mais les phénomènes qui interviennent à l'échelle des gouttes ne sont encore que partiellement maîtrisés car les interactions entre ces particules fluides, la solidification ainsi que la refusions éventuelle par projection de gouttes sur les précédentes sont difficiles à analyser expérimentalement à cause des échelles de temps et d'espace de l'ordre respectivement de la milliseconde et du millimètre. Il est donc nécessaire de faire appel à un outil numérique complexe pour prendre en compte les divers aspects physiques de cet écrasement. Les travaux menés ont eu tous pour objectif d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes dynamiques et thermiques qui se produisent à l'échelle de gouttes. Notre travail fait partie de l'ensemble de ces travaux.

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

- La géométrie de substrat joue un rôle ans l'étalement des particules .
- le modèle de transfert thermique utilise a permis d'observer que les doigts à l'extrémité de la lamelle formée ont une température élevée et se solidifient en retarde.
- Les températures du substrat et de la goutte sont inversement proportionnelles à cause du transfert de chaleur. .
- La présence de champ magnétique ne permet pas d'évité l'éclaboussement des particules

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

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
3D	Trois Dimensions
VOF SLIC	a slice- Volume Of Fluid