

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE

Projet Fin d'Études pour l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'État en Métallurgie

**Traitement de surface par projection thermique
d'une poudre métallique sur un alliage
d'aluminium.**

Proposé et encadré par :

Pr. E.SALHI

Réalisé par :

BOUKEFA Ahmed Amine

BENARAB Ahmed

Promotion Juin 2011

ENP 10, Hacén-Badi, El-Harrach, 16200 Alger
Tel. 021.52.53.01-03, Fax. 021.52.29.73 www.enp.edu.dz

مخلص:

في مجال هذه الدراسة، رمينا بوديعة من مسحوق الفولاذ الغير القابل للصدأ على ألمنيوم خام و خليط من الألمنيوم AS13 عن طريق الرش الحراري بلهب لزيادة مقاومتها للتآكل والارتداء في نطاق صناعي. الهدف الرئيسي من هذا العمل، هو دراسة الجانب المعدغرافي للمعدن الأساسي، للوديعة و الواجهة. من خلال الملاحظات المعدغرافية، قمنا بنهج الالتصاق من خلال أبعاد واجهة. سمحت لنا النتائج بتحسين قيمة الواجهة اعتمادا على مدة الرمي ودرجة حرارة التسخين ودرجة الحرارة بعد الرمي. كما أدت بنا هذه الدراسة إلى إجراء المزيد من البحوث في مجالات أخرى مما يتيح لنا تحسين معلمات الرمي.

الكلمات الرئيسية:

رذاذ الحرارة، والألمنيوم ، AS13، الالتصاق، واجهة ، والتسخين، المعدغرافيا.

Résumé :

Dans le cadre de cette étude, nous avons projeté un dépôt d'acier inoxydable en poudre sur l'aluminium pur et sur un alliage d'aluminium AS13 par projection thermique à flamme, afin d'augmenter leur résistance à la corrosion et à l'usure à l'échelle industrielle.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'aspect métallographique du métal de base, du dépôt et de l'interface. A travers les observations métallographiques, on a effectué une approche sur l'adhérence par le biais des dimensions de l'interface.

Les résultats nous ont permis d'optimiser la valeur de l'interface en fonction de la durée de la projection et de la température de préchauffage, ainsi que la température après la projection. Cette étude nous a orientés vers d'autres axes de recherches complémentaires nous permettant d'approfondir d'avantage l'optimisation des paramètres de projection.

Mots clés :

Projection thermique, aluminium, AS13, adhérence, interface, préchauffage, métallographie.

Summary :

In the frame of this study, we have thrown a deposit of stainless steel powder on pure aluminum and on aluminum alloy AS13 by thermal spray flame in order to increase their resistance to the corrosive effect and wear on the industrial scale.

The main objective of this work is to study the metallographic aspect of the base metal, the deposit and the interface. Through the metallographic observation, we have made an approach on the adhesion through the dimensions of the interface.

The results allowed us to optimize the value of the length of the projection and preheating temperature after the projection. This study directed us to other areas of complementary research allowing us to go further into the optimization of projection parameters.

Keywords :

Thermal spray, aluminum, AS13, adhesion, interface, preheating, metallography

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans la précieuse formation dont nous ont dispensée plusieurs Professeurs de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Ils nous ont permis d'ouvrir une fenêtre sur les sciences et la connaissance en générale.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance à notre promoteur le Professeur *Elsaid SALHI* d'avoir bien voulu nous prendre sous son aile, nous guider, nous conseiller, nous orienter par ses remarques scientifiques pertinentes et de nous avoir consacré de son temps si précieux. Merci Monsieur Le Professeur !

Nous sommes honorés d'être examinés par le Professeur : *KASSER* président du jury, le Docteur *N.KECHOUD* examinatrice et le Docteur *H.YOUSFI* examinateur. Ils trouveront là notre modeste contribution à une des études, oh combien nombreuses de la métallurgie, et nous sommes sûrs de leur indulgence au vu de notre inexpérience lors de nos premiers pas dans le domaine de la science.

Nos remerciements vont aussi à tout le personnel de l'entreprise « ERENAV », à leur tête le Directeur qui a bien voulu nous accueillir au sein de sa structure. Comme nous voudrions remercier Monsieur Talbi chef de l'atelier de la fonderie et Monsieur Tabti chef de l'atelier ABB.

Nous ne saurons passer sous silence le travail d'Imène, Neïla, et Widad pour leurs aides et leurs encouragements.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Et il va de soi : Merci à nos Mamans et à nos Papas pour leurs encouragements, leur conseils et pour tout.

Dédicaces

A mes très chers parents
A mes frères
A mes sœurs
A toute ma grande famille
A tous mes amis

A.BOUKEFA

A mes très chers parents
A toute ma grande famille
A tous mes amis

A.BENARAB

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction général	1
<i>Chapitre I : Recherche bibliographique</i>	
<i>1. L'aluminium et ses alliages</i>	<i>4</i>
1.1. Historique	4
1.2. La production mondiale de l'aluminium	5
1.3. Les atouts de l'aluminium	6
1.4. Principales propriétés de l'aluminium	6
1.4.1. Propriétés physiques	6
1.4.2. Propriétés thermiques	7
1.4.3. Propriétés mécaniques	8
1.4.4. Propriétés chimiques	9
1.4.5. Propriétés électriques	9
1.4.6. Résistance à la corrosion	10
1.5 Désignation des alliages d'aluminium	11
1.5.1 Les alliages d'aluminium de fonderie	12
1.5.2. Désignation des alliages d'aluminium corroyés	13
1.6. Base de la métallurgie de l'aluminium et de ces alliages	14
1.6.1. Influence des éléments d'addition	14
1.6.2. Les traitements thermiques des alliages d'aluminium	15
1.7. Théorie des alliages d'aluminium de fonderie	17
1.7.1. Alliage d'aluminium-silicium	17
1.7.2. Alliage d'aluminium-cuivre	17
1.7.3. Alliage d'aluminium-magnésium	18
1.8. Application de l'aluminium et de ses alliages	19
<i>2. Revêtement et projection thermique</i>	<i>20</i>
2.1. Les revêtements	20
2.2. La projection thermique	21
2.2.1 Historique de la projection thermique:	21
2.2.2. Place de la projection thermique parmi les traitements de surface	24

2.2.3. Principe de fonctionnement	24
2.2.3. Types de projection thermique	26
2.2.4. Formation et structure d'un revêtement	40
2.2.5. Adhérence	40

Chapitre II : Techniques expérimentales

1. Procédé de métallisation	44
2. Matériaux utilisés.....	44
2.1. Les substrats	44
2.2. Le dépôt.....	44
3. Le moulage des pièces	45
Alliage AS13	45
4. Traitement de dégazage	46
5. La préparation des surfaces pour la projection	46
6. Conditions de projection thermique.....	46
7. Protection de l'opérateur.....	47
8. Contrôle de la température.....	47
9. Métallographie	48
9.1. Préparation des échantillons.....	49
9.2. Enrobage	49
9.3. Polissage.....	50
9.4. L'attaque chimique.....	51
9.5. Observation microscopique.....	51
10. Traitement des images	54

Chapitre III : Résultats et interprétations

1. État métallographique des substrats (AS13 et l'aluminium)	56
2. Métallisation par l'acier inoxydable sur l'Al pur.....	58
2.1. La métallisation à la température ambiante	58
2.2. La métallisation par préchauffage	61
2.2.1. Préchauffage à 50°C	61
2.2.2. Préchauffage à 70°C	64
2.2.3. Préchauffage à 90°C et à 110°C	66
3. Métallisation par l'acier inoxydable sur l'AS 13.....	74
3.1. La métallisation à la température ambiante	74

3.2. La métallisation par préchauffage	74
3.2.1. Préchauffage à 50°, 70°, 90°, 110° C :	74
Conclusion	80
Conclusion général	81
Recherche bibliographique	83

Liste des figures

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure 1-1 : Production mondiale d'aluminium primaire	5
Figure 1-2 : Diagramme de phases Al-Si	17
Figure 1-3 : Diagramme de phases Al-Cu.....	18
Figure 1-4 : Diagramme d'équilibre Al – Mg	19
Figure I-5 : Evolution de la projection thermique avec le temps	24
Figure I-6: Le procédé de projection thermique.....	25
Figure I-7 : Principe de formation des couches.....	25
Figure I-8 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique.....	26
Figure I-9 : Organigramme de la projection thermique	26
Figure I-10 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre	27
Figure 1-11 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil.....	29
Figure I-12 : Schéma du procédé HVOF	32
Figure 1-13: Schéma de principe du fonctionnement d'un canon à détonation	33
Figure 1-14 : Principe de fonctionnement d'une Torche à arc électrique	35
Figure 1-15 : Schéma du procédé plasma soufflé	38
Figure 1-16 : schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté	40

Chapitre II : Techniques expérimentales

Figure II-1: Thermomètre infrarouge	48
Figure II-2 : Échantillons avant le découpage.....	49
Figure II-3 : Échantillons après le découpage.....	49
Figure II-4 : équipements de l'enrobage à froid.	50
Figure II-5 : Polisseuse utilisée de type« MECAPOL P200 ».	51
Figure II-6 : Polisseuse utilisée de type« FOCIPOLE ».	51
Figure II-7 : Microscope de type « OLYMPUS ».....	52
Figure II-8 : Les différents agrandissements du microscope X5, X10, X20,... ..	52
Figure II-9 : Schéma illustre le principe de fonctionnement du microscope.	53
Figure II-10 : Photographie du logiciel d'analyse d'image de travail « Archimed ».....	53
Figure II-11 : Photographie du logiciel de traitement d'image «Image J ».	54

Chapitre III : Résultats et interprétations

Figure III-1 : Microstructure de l'AS13	56
Figure III-2 : Microstructure de l'AS13	56
Figure III-3 : microstructure de l'aluminium	57
Figure III-4 : microstructure de l'aluminium	57
Figure III-6 : Al-acier à l'ambiante, 2 s	58
Figure III-5 : Al-acier à l'ambiante, 1 s	58
Figure III-8 : Al-acier à l'ambiante, 4 s	58
Figure III-7 : Al-acier à l'ambiante, 3 s	58
Figure III-9 : Al-acier à l'ambiante, 5 s	59
Figure III-10: Graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et du décollement (Ei) en fonction du temps de projection (Al-Acier).....	60
Figure III-11: <i>Graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt (Ed) (Al-Acier)</i>	61
Figure III-12 : Al-acier à 50°C, 1 s	62
Figure III-13 : Al-acier à 50°C, 1 s	62
Figure III-14 : Al-acier à 50°C, 1 s	62
Figure III-15 : Al-acier à 50°C, 1 s	62
Figure III-16 : Graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 50°C (Al-Acier).	63
Figure III-18 : Al-acier à 70°C, 2 s	64
Figure III-17 : Al-acier à 70°C, 1 s	64
Figure III-20 : Al-acier à 70°C, 4 s	64
Figure III-19 : Al-acier à 70°C, 3 s	64
Figure III-21 : Al-acier à 70°C, 5 s	65
Figure III-22 : graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 70°C (Al-Acier).	66
Figure III-24 : Al-acier à 90°C, 2 s	67
Figure III-23 : Al-acier à 90°C, 1 s	67
Figure III-26 : Al-acier à 90°C, 4 s	67
Figure III-25 : Al-acier à 90°C, 3 s	67

Figure III-27 : Al-acier à 90°C, 5 s	67
Figure III-28 : Al-acier à 110°C, 1 s	67
Figure III-30 : Al-acier à 110°C, 3 s	68
Figure III-29 : Al-acier à 110°C, 2 s	68
Figure III-31 : Al-acier à 110°C, 4 s	68
Figure III-32 : Le graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 90°C (Al-Acier).	69
Figure III-33 : Le graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage 110°C (Al-Acier).	70
Figure III-34 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 1s (Al-Acier)	71
Figure III-35 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 2s (Al-Acier).	72
Figure III-36 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 5s (Al-Acier).	73
Figure III-37 : AS13-acier à 50°C, 1s.....	75
Figure III-38 : AS13-acier à 70°C, 1s.....	75
Figure III-40 : AS13-acier à 110°C, 1s	75
Figure III-39 : AS13-acier à 90°C, 1s	75
Figure III- 41 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 1s (AS13-Acier).76	76
Figure III-43 : AS13-acier à 70°C, 3s	76
Figure III-42 : AS13-acier à 50°C, 3s	76
Figure III-45 : AS13-acier à 110°C, 3s	77
Figure III-44 : AS13-acier à 90°C, 3s	77
Figure III- 46: Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonctionde la température de préchauffage pour un temps de projection de 3s (AS13-Acier)..78	78
Figure III-48 : AS13-acier à 110°C, 2s	78
Figure III-47 : AS13-acier à 110°C, 1s	78
Figure III-50 : AS13-acier à 110°C, 4s	79
Figure III-49 : AS13-acier à 110°C, 3s	79
Figure III-51 : AS13-acier à 110°C, 5s	79

Figure III -52 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 110°C (AS13-Acier).....80

Liste des tableaux

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau 1-1 : Production mondiale d'aluminium primaire.....	5
Tableau 1-2 : Tension de vapeur de l'aluminium	7
Tableau 1-3 : Variation du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température.....	7
Tableau 1-4 : Coefficient moyen de dilatation thermique linéaire	8
Tableau 1-5 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température	8
Tableau I-6 : de classification d'alliages d'aluminium de fonderie.....	12
Tableau 1-7 : de désignation des alliages d'aluminium corroyés	13
Tableau 1-8 : État de base des produits corroyés	14
Tableau I-9 : Effet des éléments d'alliages de l'aluminium	15
Tableau 1-10 : utilisation de l'aluminium (en%) dans les principaux pays consommateurs	19
Tableau 1-11 : Principales techniques utilisées en traitement de surface	21
Tableau 1-12 : Principales caractéristiques des différents procédés.....	39

Chapitre II : Techniques expérimentales

Tableau II-1 : Composition chimique de l'alliage Al-Si 13%	44
Tableau II-2 : Les paramètres de projection.	47

Chapitre III : Résultats et interprétations

Tableau III-1 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection (de l'acier) à la température ambiante (Al-Acier).....	61
Tableau .III-2 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection par préchauffage de 50°C (Al-Acier).....	63
Tableau .III-3: Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection avec un préchauffage de 70°C (Al-Acier).....	65
Tableau III-4 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection avec un préchauffage de 90°C (Al-Acier).....	68
<i>Tableau III-5 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection avec un préchauffage de 110°C (Al-Acier).....</i>	<i>69</i>
Tableau III-6 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour 1 s de projection (Al-Acier).	71

Tableau III-7 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour 2 s de projection (Al-Acier).....	73
Tableau III-8 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour 5 s de projection (Al-Acier).	73
Tableau III-9 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour 1 s de projection (AS13-Acier)....	75
Tableau III-10 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 3s (AS13-Acier).....	77
Tableau III-11 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 110°C (AS13-Acier).....	81

Introduction générale

La plupart des entreprises industrielles veillent à ce que leur économie soit la meilleure possible et donc luttent contre toutes les raisons pouvant défavoriser cette dernière. Cependant, la dégradation superficielle des métaux et alliages tels que la fatigue, la corrosion, le frottement et l'usure est le phénomène le plus inquiétant dans le domaine industriel qui peut engendrer de grandes pertes économiques en endommageant les pièces métalliques utilisées dans les différentes industries.

C'est pourquoi il est nécessaire de lutter contre ces phénomènes afin de diminuer ces pertes. A cet effet, les différentes technologies de dépôt et les traitements de surface sont incontournables car ils permettent de rénover et de protéger ces pièces mécaniques. Parmi ces traitements, on cite : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (PVD et CVD) et la projection thermique.

La projection thermique est un terme générique qui regroupe un ensemble de procédés utilisés pour déposer des matériaux métalliques et non métalliques sur une pièce à revêtir. Elle a pour objectif le rechargement des matériaux endommagés ou la mise des couches protectrices afin de satisfaire les exigences sévères.

Cette technique est couramment utilisée dans de nombreux secteurs industriels tels que la construction navale (pale d'hélice, les coques des navires usées,...), nucléaire, aéronautique (ailettes de turbines fixes, chambre de combustion, pièces d'usure et d'abrasion,...), automobile (têtes de soupape, pales de turbocompresseur, pistons,...), industrie papetière, minière, chimique,... Elle permet de modifier les propriétés de volume de la pièce et de lui conférer des propriétés spécifiques en surface pour une bonne résistance à la corrosion et à l'usure ou des propriétés fonctionnelles (chimiques, électriques, magnétiques).

Dans le présent mémoire, on s'intéresse à l'étude de la projection thermique par flamme poudre d'un acier inoxydable sur deux substrats, l'aluminium pur et un alliage d'aluminium AS13. Ceci rentre dans le cadre d'un axe de recherche, dans le quel on étudie la projection flamme-poudre, vu que l'étude de la projection flamme-fil a été déjà réalisée, et que le traitement de surface sur les alliages d'aluminium rentre dans le cadre de l'axe de recherche du labo LSGM.

Notre choix s'est porté sur l'aluminium, car ce métal et ses alliages sont largement utilisés dans l'industrie et en particulier dans la fonderie pour leurs excellentes propriétés mécaniques et physiques, telles que, la faible densité, la très haute résistance à la corrosion, la bonne ductilité, la très bonne usinabilité, et la très bonne conductibilité électrique et thermique. Parmi ces alliages d'aluminium, les plus connus sont les alliages d'Al-Si, Al-Cu et Al-Mg. L'industrie automobile utilise intensivement l'alliage Al-Si par rapport aux autres alliages de fonderie.

Cette étude a pour objectifs :

- ✓ La réalisation de revêtements d'acier inoxydable par projection thermique (flamme-poudre) sur deux substrats, l'aluminium et un alliage d'aluminium AS13.
- ✓ La caractérisation métallurgique des échantillons obtenus, basée principalement sur une analyse métallographique.
- ✓ Et enfin l'influence des paramètres, temps et température de préchauffage sur l'évolution de l'interface et sur l'adhérence entre le dépôt et le substrat.

Pour cela, la présentation est scindée en trois chapitres :

- 1) Une recherche bibliographique ayant conduit à deux parties :
 - La première partie fait le point sur l'état actuel des connaissances concernant l'aluminium et ses différents alliages de fonderie ainsi que leurs différentes caractéristiques.
 - La deuxième partie présente une brève étude bibliographique sur les différentes techniques de projection thermique qui permettent de décrire le procédé flamme poudre.
- 2) Une partie expérimentale dans laquelle on a exposé nos techniques expérimentales et les différents outils utilisés pour notre recherche.
- 3) Le dernier chapitre est réservé à la présentation et à l'interprétation des résultats.

Ce travail sera bien sûr clôturé par une conclusion.

Chapitre I:

Recherche bibliographique

1. L'aluminium et ses alliages

1.1. Historique

L'aluminium est le métal le plus récemment découvert puisqu'il n'est utilisé industriellement que depuis la fin du XIX^e siècle.

Pourtant l'alun, sulfate double d'aluminium et de potassium, le plus anciennement connu, était déjà décrit par Pline [1].

C'est le chimiste Louis Guyton de Morveau (1736-1816), un des collaborateurs d'Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), qui appela « alumine » l'un des sulfates contenu dans l'alun. Le mot « alumine » dérive du latin alumen qui aurait désigné pendant la période romaine l'alun de potassium $KAl(SO_4)_2, 12H_2O$. Les composés de l'aluminium étaient utilisés en grande quantité dans la fabrication des poteries antiques, et comme colorant et astringent en médecine [2].

C'est à sir Humphrey Davy (1778-1829) que l'on attribue la découverte du métal qu'il « alumine » en 1809. Par électrolyse de sels fondu d'aluminium, il obtient un alliage d'aluminium et de fer parce qu'il avait utilisé une cathode en fer [2].

Les chimistes Hans Christian Ørsted (1777-1851) et ensuite Friedrich Wöhler (1800-1882) s'orientèrent sur la réduction de chlorure d'aluminium par du potassium, Le chlorure était préparé par chloration de la bauxite en présence de charbon [2].

C'est Wöhler (1800-1882) qui réussit en 1827 à produire du métal suffisamment pur pour pouvoir déterminer quelques-unes de ses propriétés dont sa faible densité [2].

Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Sainte-Claire-Deville [1] présente le premier lingot d'aluminium obtenu à l'état fondu. En 1859, Henry Merle [1] l'a mis en application dans l'industrie d'où l'émergence de la société Pechiney. Mais ce procédé était compliqué, ce qui donnait un métal très cher, réservé à des utilisations dans le luxe et l'orfèvrerie.

En 1886, Paul Louis Toussaint Héroult [1] en France et Charles Martin Hall [1] aux Etats Unis déposent indépendamment leurs brevets sur la production d'aluminium par électrolyse à chaud à partir de l'alumine, et de l'oxyde déshydraté de l'aluminium, dissout dans de la cryolithe fondue (fluorure double de sodium et d'aluminium).

Bayer déposa en 1887 un brevet d'extraction de l'alumine à partir de la bauxite par attaque à chaud à la soude de la bauxite. Héroult partit en Suisse à Neuhausen pour appliquer son invention et revint en France l'année suivante créer en 1888 l'atelier de Forges près de Grenoble [2].

Plusieurs usines furent installées en France, en Suisse et aux Etats-Unis. L'aluminium est ainsi entré dans sa phase industrielle ; sa production a connu en 100 ans

une croissance prodigieuse, le mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux derrière le fer.

1.2. La production mondiale de l'aluminium

Avec 25 millions de tonnes de consommation mondiale annuelle, l'aluminium occupe la première place de la métallurgie des métaux non ferreux. La production d'aluminium primaire connaît une croissance régulière depuis 1950 comme présentée sur le *tableau 1-1* et la *figure 1-1*.

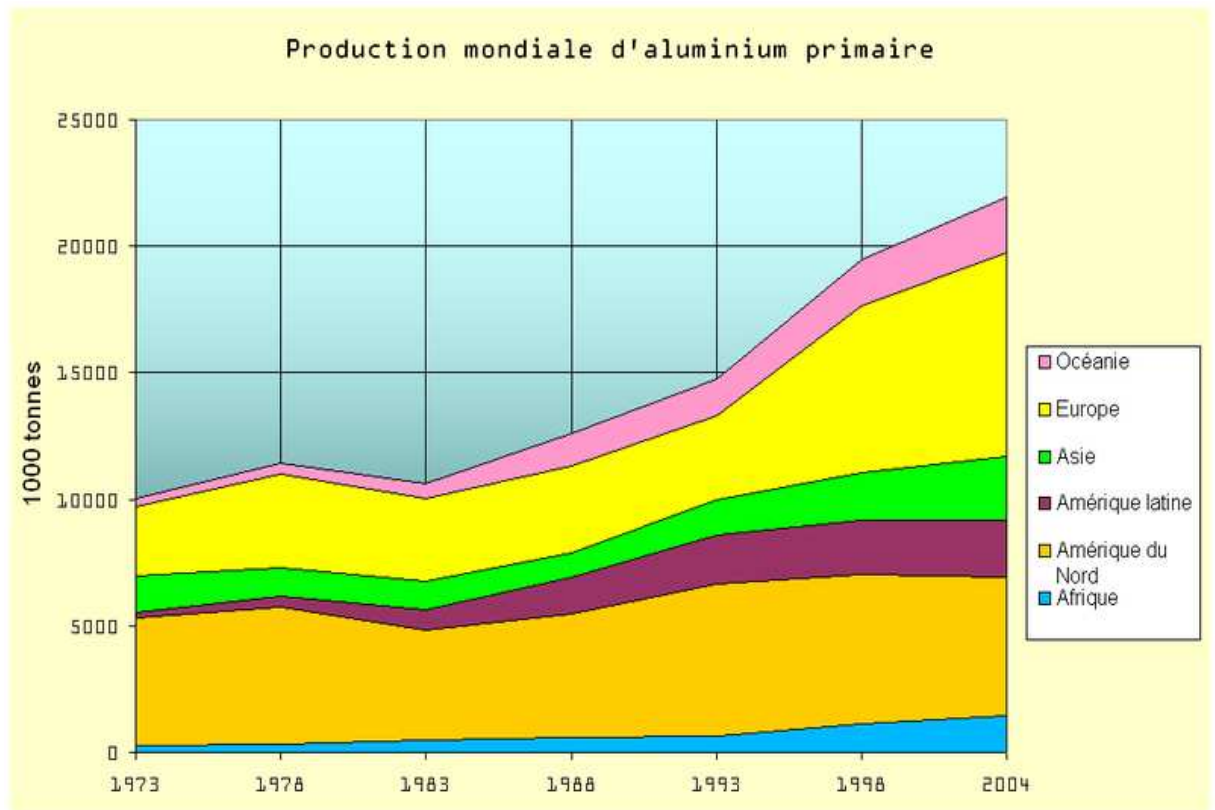


Figure 1-1 : Production mondiale d'aluminium primaire [3].

Tableau 1-1 : Production mondiale d'aluminium primaire [2].

Année	en kT
1900	5,7
1910	44
1930	270
1940	780
1950	1 500
1960	4 500
1970	10 000
1980	16 700
1990	19 400
2000	22 000
2005	23 000

1.3. Les atouts de l'aluminium

Le développement des applications de l'aluminium et de ses alliages et la croissance régulière de la consommation s'explique par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs, en particulier dans les transports, le bâtiment, l'industrie électrique et l'emballage.

Ces atouts sont :

- La légèreté.
- La conductivité thermique.
- La conductivité électrique.
- L'attitude aux traitements de surface.
- La tenue à la corrosion.
- La diversité des alliages d'aluminium.
- La diversité des demi-produits.
- La fonctionnalité des demi-produits filés et moulés.
- La facilité de mise en œuvre.
- Le recyclage [2].

1.4. Principales propriétés de l'aluminium

1.4.1. Propriétés physiques

❖ Propriétés atomiques et cristallines

Ces propriétés sont les suivantes :

- Numéro atomique : 13.
- Masse atomique : 26,98 u.m.a.
- Principal isotope : A127 stable comprenant 14 neutrons et 13 protons.
- Valence dans les composés chimiques : 3.
- Structure cristalline cubique à face centrées stable à toute température.
- Constante réticulaire : $4,049596 \times 10^{-10}$ m à 25 °C.
- Diamètre atomique : $2,86 \times 10^{-10}$ m.
- Volume atomique : $9,999 \times 10^{-6}$ m³/mol [4].

❖ masse volumique

La masse volumique de l'aluminium est de 2,7 kg/dm³. L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport automobile et maritime.

1.4.2. Propriétés thermiques

❖ Fusion

La température de fusion est de 660°C pour un aluminium de pureté titrée à 99,996% ; intervalle de fusion est de 657-664 °C pour un aluminium de pureté titrée de 99,00 à 99,50%.

La chaleur de fusion équivaut à 2.56 kJ/kg, ou 95 cal/g.

❖ Vaporisation

La température d'ébullition est de 2500 °C environ. La chaleur de vaporisation est de 10 780kJ/kg.

A l'état liquide, l'aluminium liquide a une très faible tension de vapeur à basse température mais qui s'élève très vite avec celle-ci (voir *tableau 1-2*),

Tableau 1-2 : Tension de vapeur de l'aluminium [5].

$7,4 \times 10^{-11}$	atm	à 727 °C
$3,0 \times 10^{-6}$	atm	à 1 127 °C
$9,8 \times 10^{-4}$	atm	à 1 527 °C
0,037	atm	à 1 927 °C
0,728	atm	à 2 427°C

❖ Dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'aluminium est $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ à la température 20 à 100°C (*tableau 1-3*)

Tableau 1-3 : Variation du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température [5].

$8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	à - 198 °C
$17,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	à - 123°C
$20,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	à - 73 °C
$24,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	à + 127 °C
$28,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	à + 327 °C
$33,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	à + 527 °C

Le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'aluminium est $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ à la température de 20 °C, il varie en fonction de la température.

Le coefficient moyen de dilatation thermique linéaire entre deux températures est plus souvent utilisé, il est alors fonction du domaine de température considéré (*Tableau 1-4*).

Tableau I-4 : Coefficient moyen de dilatation thermique linéaire [5].

$23,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	entre + 20 et + 100 °C
$24,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	entre + 20 et + 200 °C
$25,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	entre + 20 et + 300 °C
$26,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	entre + 20 et + 400 °C
$27,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	entre + 20 et + 500 °C

❖ Conductivité thermique

La conductivité thermique est de 237 W/ m x K à la température ambiante. Elle varie en fonction de la température (Tableau I-5) [4].

Tableau I-5 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température [4].

302 W/ m x K	à - 173 °C
237 W/ m x K	à + 20 °C
208 W/ m x K	à + 660 °C -état solide-
091 W/ m x K	à + 660 °C -état liquide-

Au-dessous de -173°C, la conductivité thermique de l'aluminium de pureté titrée à 99,99% et plus, est très sensible au niveau des impuretés.

❖ Propriétés thermo-chimiques

La capacité thermique massique est de 9010 J/kg.K, soit une capacité thermique molaire de 24,29 J/kg.K.

L'entropie est de 1050 J/kg. K, soit une entropie molaire de 28,33 J/mol.K.

I.4.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés de l'aluminium non allié recuit sont très faibles ; ainsi pour l'aluminium à 99.5% :

- ✓ une résistance mécanique $R_m=70-80 \text{ MPa}$.
- ✓ une limite élastique conventionnelle $R_p 0,2=10-20 \text{ MPa}$.
- ✓ un allongement $A\%=50-60$.
- ✓ un module de Young $E=65\ 000 - 70\ 000 \text{ MPa}$.
- ✓ un coefficient de Poisson $\nu=0,36$ [6].

En effet, les propriétés mécaniques sont fortement modifiées par la déformation plastique à température proche de l'ambiante. Ainsi après écrouissage, le chauffage entraîne des phénomènes de restauration et de recristallisation analogues à ceux décrits dans le cas des aciers.

✓ Propriétés mécaniques à chaud

D'une façon générale, les caractéristiques mécaniques à chaud des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. Cette diminution dépend de différents facteurs dont les plus importants sont la nature de l'alliage, la durée du maintien et la température de maintien [7].

✓ Propriétés mécaniques aux basses températures

Grâce à leur structure cristalline cubique à faces centrées stables à toutes températures, les alliages d'aluminium ne présentent aucun phénomène de fragilisation dans le domaine de basses températures, ceci contrairement aux métaux à structure cubique centrée tels que le fer et certains aciers [5].

1.4.4. Propriétés chimiques

La position de l'aluminium dans la série des potentiels électrochimiques le rend très réactif ($E^{\circ}_{Al/Al^{+3}} = -1,66 \text{ V/ ENH}$), ce qui pourrait faire craindre une grande corrodabilité. Cette grande réactivité implique une très forte affinité pour l'oxygène, ce qui fait que l'aluminium se recouvre d'une pellicule très dure et adhérente d'oxyde Al_2O_3 qui stoppe la réaction d'oxydation en profondeur et permet à l'aluminium de s'auto protéger en se passivant. Cette couche d'oxyde plus ou moins hydratée a une résistance chimique limitée car elle résiste bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique, et nitrique, par contre, les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par l'anodisation qui est un traitement permettant d'obtenir une couche épaisse d' Al_2O_3 mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude [8].

1.4.5. Propriétés électriques

❖ Résistivité électrique

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs.

La résistivité électrique généralement admise pour l'aluminium de pureté 99,996% à la température ambiante est de $2,6548 \times 10^{-8} \Omega.m$, soit une conductivité de 64,94% IACS (international annealed copper standard).

Les impuretés et les éléments d'addition ont une influence plus ou moins importante sur la résistivité. Les éléments qui ne sont pas en solution solide ont relativement peu d'influence. Par contre, ceux qui entrent en solution solide peuvent augmenter assez fortement cette propriété. Il en est ainsi pour le manganèse et le titane.

L'aluminium commercial utilisé dans les applications électriques titre généralement 99,7% et présente une résistivité de $2,72 \mu \Omega.cm$ soit 63,5 % IACS la résistivité augmente suivant la température selon la formule :

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + a (t - 20)]$$

Où :

ρ_t = La résistivité à t °C

ρ_{20} = La résistivité à 20 °C

a = Coefficient de température égale à $0,00429^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour l'aluminium titré à 99,996 % et qui diminue lorsque le titre de l'aluminium diminue; ce coefficient atteint 0,004 pour 99,00%.

La résistivité diminue lorsque la température est basse. Aux très basses températures, la résistivité est essentiellement fonction de la pureté de l'aluminium. A la température de l'hélium liquide, de très faibles variations dans le niveau des impuretés entraînent de très grandes variations de la résistivité.

❖ Supraconductivité

L'aluminium devient supraconducteur près du zéro absolu : la température de transition est alors comprise entre 1,14 et 1,20 K.

1.4.6. Résistance à la corrosion

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction navale.... On dispose maintenant de nombreuses références d'équipements en service depuis plusieurs décennies, et même une référence centenaire avec la toiture de l'église San-Gioacchino à Roma, installée en 1898.

C'est donc avec un sérieux recul que l'on peut parler de la tenue à la corrosion de l'aluminium. Elle est en effet un critère très important dans le choix d'un métal ou d'un alliage, dès lors que celui-ci est soumis à l'action de l'humidité, des intempéries, de l'eau, du milieu marin, d'une atmosphère industrielle,.....

Ainsi cette tenue à la corrosion dépend des paramètres suivants :

- Le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface,..... ;
- Les conditions de service prévues ;
- Le mode d'assemblage éventuel des structures, les dispositions constructives ;
- La durée de service espérée, la fréquence d'entretien.

Il faut souligner qu'il n'y a pas de métal ou d'alliage (universel) en termes de tenue à la corrosion, c'est-à-dire qui serait en mesure de résister à tous les milieux possibles que ce soit des acides, des bases (minéraux ou organiques), dans toutes atmosphères aussi bien humides que chargées en composées du soufre, en poussières.... C'est la raison pour laquelle les métallurgistes ont mis au point des alliages spécifiques pour répondre aux exigences particulières de résistance à la corrosion.

Généralement, il y a des différences de tenue à la corrosion entre les alliages du même métal de base. C'est aussi le cas pour les alliages d'aluminium. Il en résulte que, du seul point de vue de résistance à la corrosion, ils ne sont toujours pas interchangeables.

C'est volontairement que ce texte se limite à rappeler quelques aspects essentiels de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages tels que :

- Le rôle du film d'oxyde naturel ;
- Les formes de corrosion habituelles que l'on peut observer sur l'aluminium et ses alliages.

❖ Rôle du film d'oxyde

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé alumine qui le rend passif à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant (l'oxygène de l'air, l'eau). C'est ainsi qu'il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage, soudage

Bien qu'il ait une très faible épaisseur, comprise entre 5 et 10 nanomètres, ce film d'oxyde constitue une barrière entre le métal et le milieu environnant. Sa stabilité physico-chimique a donc une très grande importance sur la résistance à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages. Elle dépend, en particulier, des caractéristiques du milieu.

❖ Les différentes formes de corrosion

Il n'y a pas de forme de corrosion spécifique aux alliages d'aluminium. Celles qui peuvent se rencontrer habituellement sont les suivantes :

- La corrosion uniforme.
- La corrosion par piqûres.
- La corrosion cavernueuse ou sous dépôt.
- La corrosion feuilletant.
- La corrosion inter cristalline.
- La corrosion sous contrainte.
- La corrosion galvanique [5].

1.5 Désignation des alliages d'aluminium

Les principales nuances normalisées sont divisées en deux grandes familles : les aluminiums corroyés, obtenus par déformation plastique (laminage...) et les aluminiums pour la fonderie. Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes : ceux pouvant être traités

thermiquement ou trempant et ceux ne pouvant pas être traités thermiquement ou non trempant [9].

1.5.1 Les alliages d'aluminium de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie (série à trois chiffres) sont les plus versatiles de tous les alliages de fonderie et ils offrent de façon générale une facilité de mise en forme, contrairement aux alliages de corroyage (série à quatre chiffres). Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

- Une bonne fluidité pour bien remplir toutes les parties du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, ce qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.
- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Une bonne stabilité chimique.
- Un bon fini de surface avec des surfaces lustrées et peu ou pas de défauts [10].

❖ Classification des alliages d'aluminium de fonderie

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0). L'élément d'alliage principal est le premier chiffre. Les deuxième et troisième chiffres identifient l'alliage spécifique s'il s'agit d'une pièce moulée (.0) ou d'un lingot (.1 Ou .2) voir *le tableau I-6* [9].

Tableau I-6 : classification d'alliages d'aluminium de fonderie [9].

Séries d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1xx.x	99% d'aluminium minimum
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium
4xx.x	Silicium +cuivre et/ou magnésium
5xx.x	Magnésium
6xx.x	N'existe pas
7xx.x	Zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments

1.5.2. Désignation des alliages d'aluminium corroyés

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium telles que séries 1000, 2000 jusqu'à 8000 le deuxième chiffre (xXxx), s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique. Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série. Par exemple pour l'alliage 5183, le chiffre 5 indique qu'il s'agit d'un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu'il s'agit de la première modification par rapport à l'alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l'alliage dans la série 5xxx.

La seule exception dans la série est la série 1xxx (l'aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimale au-dessus de 99%. L'alliage 1350 contient donc au moins 99,50% d'aluminium (voir le *tableau 1-7*).

Tableau 1-7 : désignation des alliages d'aluminium corroyés [9].

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu – Al ₂ CuMg
3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
4000	4XXX	Silicium (Si)	-
5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
8000	8XXX	Autres éléments	-
9000	/	Non utilisé	-

❖ Désignation du traitement

On peut obtenir des alliages d'aluminium en divers états, écrouis ou trempés et vieillis.

On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles. Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie. Les subdivisions des états de base sont indiquées par un ou plusieurs chiffres suivant la lettre de l'état de base (*tableau 1-8*) [6].

Tableau 1-8 : État de base des produits corroyés [6].

<i>Aluminium et alliages d'aluminium NF EN 515</i>	<i>Etat de base</i>
F	Etat brut de fabrication
O	Etat recuit
H	Etat écroui
T	Etat traité thermiquement
W	Etat trempé non stabilisé

1.6. Base de la métallurgie de l'aluminium et de ces alliages

1.6.1. Influence des éléments d'addition

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques faibles souvent insuffisantes pour l'utilisation, on est conduit pour améliorer ces propriétés, à ajouter des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure du métal. Les atomes de ces éléments peuvent être en solution solide de substitution, c'est-à-dire prendre la place des atomes d'aluminium dans le réseau : plus petits (cas du cuivre), ou plus gros (cas du magnésium) que l'atome d'aluminium. Ils perturbent le réseau qui devient ainsi plus difficile à déformer.

Les atomes de ces éléments peuvent également former des précipités hors solution solide: cohérent, semi-cohérent ou cohérent avec la matrice aluminium, qui auront le même effet, à savoir provoquer des déformations. Le durcissement de l'aluminium sera ainsi régi par le nombre et l'importance de ces perturbations. La nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition sont primordiales à cet égard.

On réalise ainsi des alliages industriels de composition plus ou moins complexe. Cependant, on peut considérer que ces alliages comportent une ou plusieurs additions principales et des additions secondaires.

❖ Addition principale

Les additions principales sont déterminantes pour les différentes propriétés métallurgiques et technologiques ; elles conditionnent de plus l'appartenance aux différents groupes d'alliages définis précédemment. Ces additions sont en fait peu nombreuses ; il s'agit du cuivre, du silicium, du magnésium, du manganèse, et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium et zinc +magnésium + cuivre (Tableau 1-9)

Tableau I-9 : Effet des éléments d'alliages de l'aluminium [11].

Éléments	Effets
<i>Cuivre</i>	<i>Augmente la résistance mécanique</i>
<i>Manganèse</i>	<i>Augmente la résistance mécanique et modifie la taille des grains</i>
<i>Magnésium et silicium</i>	<i>Augmentent la résistance à la corrosion atmosphérique</i>
<i>Zinc</i>	<i>Augmente la résistance mécanique</i>

❖ Addition secondaire

Ce sont différents métaux rajoutés dans certains alliages, souvent en quantité plus faible (moins de 1%), pour obtenir une propriété particulière mais sans changer le groupe d'appartenance. Les principaux métaux sont :

Le fer, le chrome, le zirconium, le nickel, le strontium, le cobalt, le plomb, le bismuth, le cadmium, le titane, le béryllium, le bore [5].

1.6.2. Les traitements thermiques des alliages d'aluminium

On peut diviser les traitements des alliages d'aluminium en trois types [6] :

- Les traitements d'homogénéisation,
- Les traitements d'adoucissement,
- Les traitements de durcissement structural.

a) Les traitements d'homogénéisation

Ce sont des traitements comportant un chauffage à température relativement élevée appliquée à certains produits bruts de fonderie ou corroyés et destinés le plus souvent à faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage)[11.6].

Ils consistent en général à effectuer des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450°C à 610°C, qui ont pour but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

b) Les traitements d'adoucissement

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux des aciers [11].

Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

- le traitement de restauration est effectué entre 200 à 300°C pendant 1 à 8 heures.
- le traitement de recristallisation est effectué entre 300 à 400°C pendant 0,5 à 3 heures.

c) Traitements de durcissement structural

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique.

❖ Aspects métallurgiques

Pour obtenir le durcissement structural, les trois phases ci-après sont nécessaires.

✓ Première phase : mise en solution

Elle consiste en un maintien à une température suffisamment élevée afin de dissoudre, c'est-à-dire mettre en solution solide, les éléments d'addition présents dans l'alliage en phases dispersées.

✓ Deuxième phase : trempe

Après sa mise en solution, l'alliage doit être refroidi suffisamment rapidement pour maintenir à la température ambiante la solution solide : c'est le traitement de trempe. Aussitôt après trempe, l'alliage est dit dans un état de « **trempe fraîche** », il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité.

✓ Troisième phase : maturation – revenu

Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel.

Le durcissement est stabilisé au bout d'un certain temps dépendant de la composition de l'alliage : en général quelques jours pour les alliages série 2000, une à quelques semaines pour les alliages série 6000, quelques mois pour les alliages série 7000.

Pendant les premières heures de la maturation, l'alliage peut être considéré dans l'état de trempe fraîche et présente alors une plasticité suffisante pour supporter des mises en forme importantes.

Pour beaucoup d'alliages, le durcissement peut être augmenté par un traitement à une température supérieure à l'ambiante : c'est le traitement de **revenu** ou **vieillissement artificiel** qui confère une microstructure différente de celle de maturation et conduit à des caractéristiques supérieures, en particulier pour la limite d'élasticité.

1.7. Théorie des alliages d'aluminium de fonderie

1.7.1. Alliage d'aluminium-silicium

Dans le diagramme d'équilibre Al-Si, présenté à la figure 1-2, on peut remarquer une solubilité presque nulle à l'état solide de l'un des métaux dans l'autre.

Il y a constitution d'un alliage eutectique à la concentration de 11,7 % de Si. Au-dessous de cette concentration, l'aluminium se solidifie en premier et l'eutectique Al-Si se forme aux joints de grains. Au-delà de cette concentration il y a formation de silicium primaire et solidification finale de l'eutectique. Il n'y a pas de formation de phases intermétalliques [12].

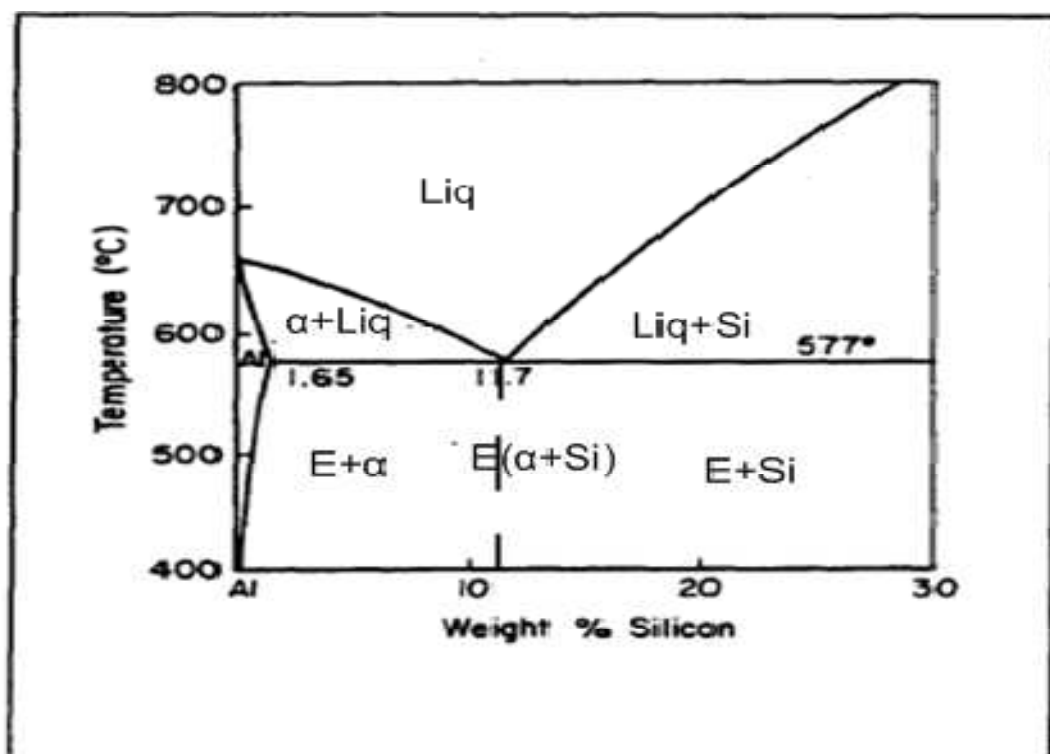


Figure 1-2 : Diagramme de phases Al-Si [12].

1.7.2. Alliage d'aluminium-cuivre

Le cuivre est l'un des éléments d'alliages le plus important dans l'aluminium, notamment à cause de sa solubilité et de sa contribution au durcissement du métal. Plusieurs alliages commerciaux contiennent du cuivre, soit comme élément majeur d'addition ou comme élément complémentaire dans les alliages ternaires ou quaternaires ; il est souvent utilisé avec le magnésium et le silicium dans les alliages d'aluminium.

Le diagramme d'équilibre Al-Cu est présenté à la figure 1-3. Au point eutectique, le liquide est en équilibre avec une solution solide contenant 5,7 % en masse de cuivre et le composé CuAl_2 . La phase Θ (CuAl_2) possède un domaine de composition compris entre 52,5 et 53,7 % en masse de cuivre à la température de l'eutectique.

Les réactions de précipitation sont les suivantes :

Solution sursaturée en cuivre → plaquettes cohérentes "Guinier-Preston" → plaquettes cohérentes Θ'' → plaquettes semi-cohérentes Θ' → précipité non cohérent Θ [12].

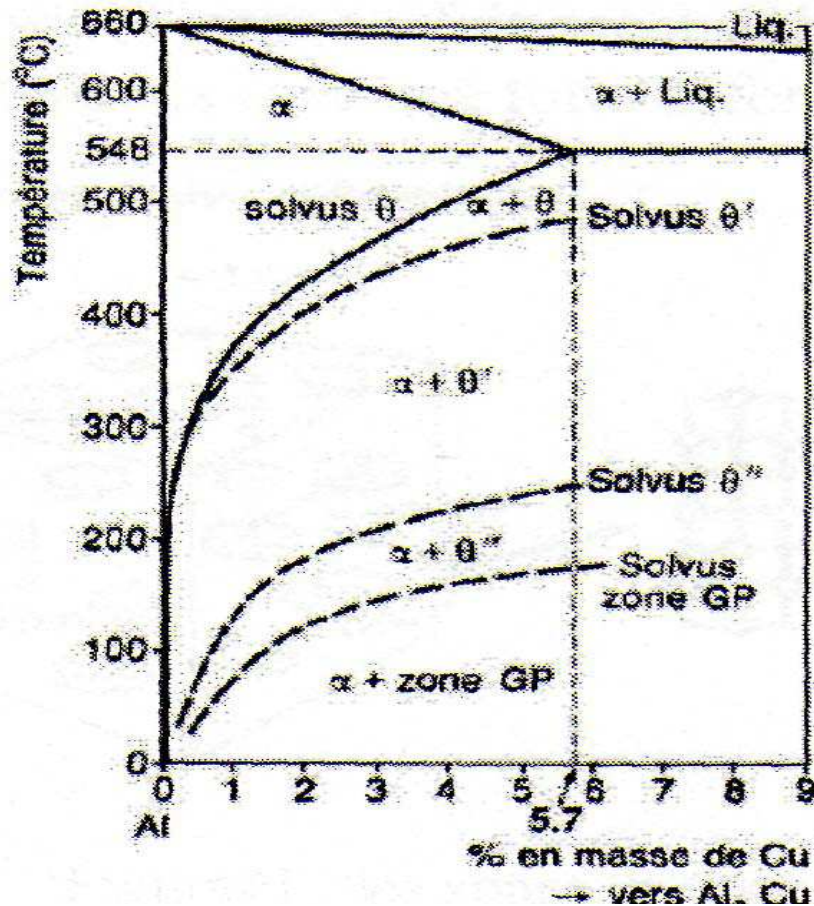


Figure 1-3 : Diagramme de phases Al-Cu [12].

1.7.3. Alliage d'aluminium-magnésium

Les alliages industriels Al-Mg ont tous pour constituant la solution solide α mais la variation importante de la solubilité du Mg et sa faible vitesse de diffusion à l'état solide, font que les alliages contenant plus de 6 % de Mg ne sont pas homogènes à l'état brut de coulée. On trouve l'eutectique [$\alpha + \beta$] à 37% (figure 1-4).

Pour ces alliages :

- La coulabilité est moins bonne que pour les alliages précédents.

Les alliages de magnésium sont recherchés pour leur bonne usinabilité mais surtout pour leur très grande résistance à la corrosion [14].

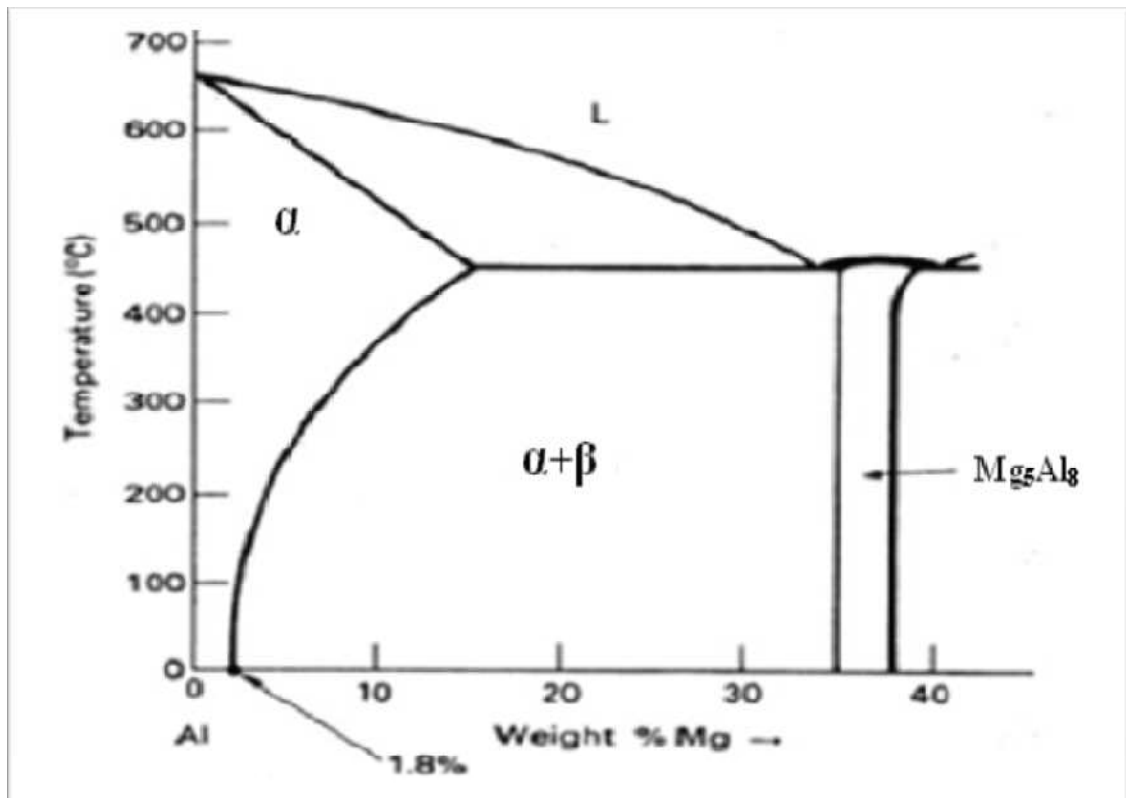


Figure 1-4 : Diagramme d'équilibre Al – Mg [14].

1.8. Application de l'aluminium et de ses alliages

Le tableau 1-10 donne les grands domaines d'utilisation de l'aluminium dans les pays gros consommateurs. On constate que le domaine des transports a une place privilégiée et arrive au premier rang en Europe, et particulièrement en France. Des différences très sensibles apparaissent par ailleurs dans les autres secteurs : c'est ainsi que les utilisations dans le domaine de la construction électrique ont une place importante en France, que celles concernant le bâtiment sont au tout premier plan au Japon, alors qu'elles sont moins développées en France, et enfin que les applications dans l'emballage dominant aux USA grâce à l'essor des boîtes boissons [5].

Tableau 1-10 : utilisation de l'aluminium (en%) dans les principaux pays consommateurs [5].

	France	Europe	USA	Japon
Transports	33	26	22	29
Electricité	16	10	10	7
Bâtiment	12	21	22	32
Emballage	10	11	29	8

2. Revêtement et projection thermique

Le développement des traitements de surface est un domaine prioritaire dans la mise en œuvre des matériaux, qui a pour objectif d'améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et à la fatigue thermique ou encore l'aspect esthétique.

Différentes technologies de dépôt et traitements de surface permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface. Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (PVD et CVD) et la projection thermique.

2.1. Les revêtements

On entend par traitement de surface toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour conséquence de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données [15].

Les revêtements sont des traitements superficiels conduisant à la formation de couches épaisses et devant répondre à plusieurs fonctions telles que:

- Protéger le métal de base contre les hautes températures.
- L'accroissement de la tenue mécanique, de la résistance à la fatigue et la résistance aux différents types d'usure (abrasion, adhésion, érosion,...etc.).
- L'amélioration du frottement.
- L'isolation thermique ou électrique (projection de céramique...) [16].

Les traitements de surface se répartissent en quatre familles distinctes comme il est présenté sur le *tableau 1-11* :

a. Les traitements à partir de vapeur ou gaz

- Dépôt chimique sous vide,
- Dépôt physique sous vide

b. Les traitements à partir des phases liquides ou semi liquides

- La projection thermique

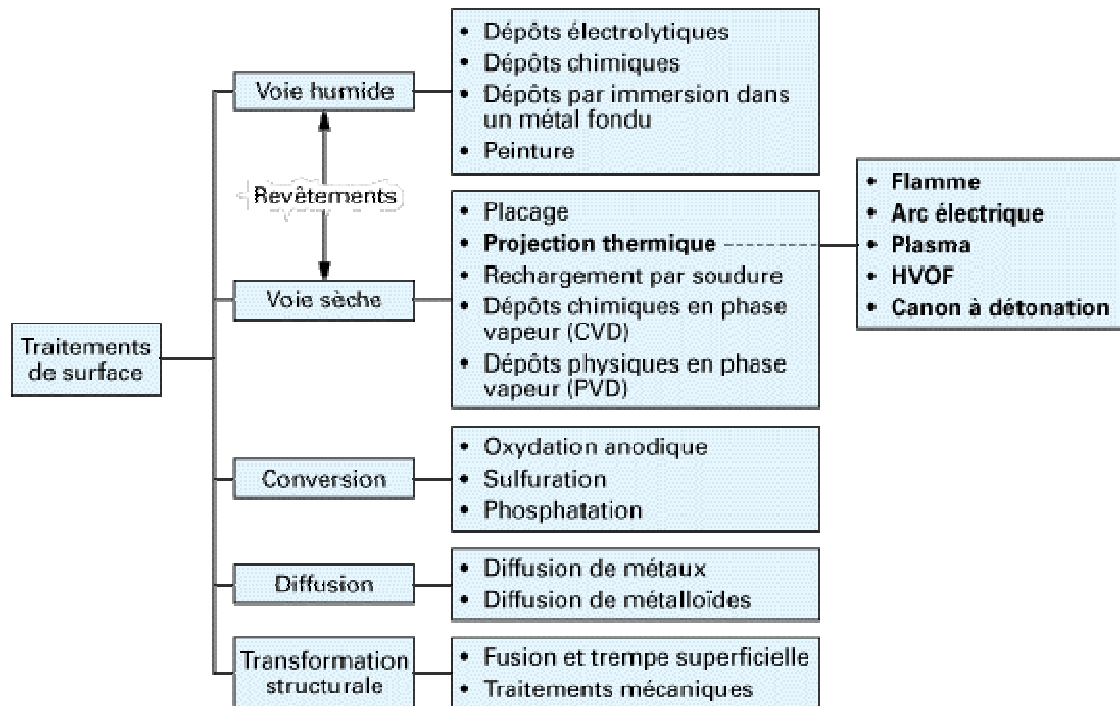
c. Les traitements à partir de solution

- Dépôts électrolytiques,
- Dépôts chimiques,
- Traitements de conversion

d. Les traitements mécaniques

- Matoplastie,
- Explosion [17].

Tableau 1-11 : Principales techniques utilisées en traitement de surface [18].



2.2. La projection thermique

2.2.1 Historique de la projection thermique:

❖ Les impacts de balles :

Tout commence au début du 20^{ème} siècle, vers 1909, lorsqu'un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich Schoop, constate des traces de plomb laissées par l'impact d'une balle sur un mur. L'idée germa dans son esprit de créer un revêtement par projection de métal fondu. En effet, si le plomb avait adhéré au mur, c'était dû à sa fusion instantanée au contact de ce dernier. La force vive du corps lancé à grande vitesse, se transforme en chaleur au moment de l'impact. Mais ce phénomène, ne pouvait s'obtenir qu'avec des métaux dont le point de fusion était relativement bas.

Afin de pouvoir projeter tous types de métaux, Schoop eut alors l'idée de faire fondre le métal avant de le projeter dans cet état sur les pièces à traiter. Il n'y avait plus d'obstacle théorique, il restait à passer à la pratique.

Le "revêtement de surface par projection thermique" était né, plus connu par la suite sous le nom de "métallisation" [18].

❖ **Le système original Schoop**

Il construisit les premiers appareils à métalliser basés sur son principe. Ils étaient composés d'un creuset, où le métal fondu était maintenu à l'état liquide par un système de chauffage et d'un appareil de projection, fonctionnant à l'aide d'un fluide, tel que l'air, préalablement réchauffé. Mais outre que l'appareil était absolument intransportable, il se heurtait à des difficultés considérables : notamment, celle de maintenir le métal suffisamment chaud et fluide, pendant son transport et sa projection, ainsi que la destruction rapide des tuyères et des buses.

Aussi, Schoop chercha rapidement une autre solution et en 1911, il eut l'idée de remplacer le métal fondu par de la poudre métallique, qui en passant au centre d'un chalumeau oxyacétylénique était mise en fusion avant sa projection. Cette évolution, permettait d'éviter de garder le creuset rempli de métal fondu et le réchauffement du fluide transporteur. Il devient alors possible de séparer le réservoir à poudre de l'équipement de projection et de rendre donc l'appareil portable.

La métallisation avait donc fait un premier pas.

❖ **L'évolution du système**

Mais cette solution n'était pas parfaite, car il était impossible de fondre correctement des poudres métalliques à haut point de fusion. De plus l'entraînement régulier de la poudre était difficile à obtenir, que ce soit par soufflage ou par aspiration à partir d'un réservoir. Malgré l'adjonction de vibreur pour éviter les tassements, la poudre s'agglomérait interdisant une régularité parfaite. Les conséquences étaient une poudre trop brûlée, lors d'un passage trop faible dans le chalumeau, ou une poudre mal fondue lors d'un passage par excès. Résultat, les revêtements étaient peu homogènes et d'une adhérence douteuse.

C'est alors qu'en 1912, un nouveau pas, sans doute le plus important fut fait, en remplaçant la poudre par du fil métallique. Ce nouveau système présentait de nombreux et importants avantages, comme l'automatisme complète, la grande autonomie de travail, la constance du passage du fil et la régularité dans l'homogénéité du revêtement. De plus, les revêtements étaient plus sains, du fait de la forte réduction des oxydes contenus dans le fil de métal.

Depuis 1914, le pistolet à fil et gaz n'a cessé de se perfectionner pour devenir un outil facile et sûr.

Par la suite, Schoop remplace le chalumeau par un arc électrique comme source de chaleur pour fondre le métal, qui était projeté par un jet d'air comprimé sur le substrat. A cette époque, les sources énergétiques ne permettaient pas de fiabiliser le système qui resta à l'état expérimental, avant d'être repris et amélioré après la deuxième guerre mondiale.

❖ La récompense

En 1917, Schoop reçoit la récompense de John Scott, créée en 1834, qui honore le mérite des inventeurs, pour: "le procédé du brouillard en métal de Schoop". D'autres sont aussi récompensés tels que Marie Curie, Guglielmo Marconi, les frères de Wright et Thomas Edison.

En 1924, Ulrich Max Schoop s'installe définitivement dans la renommée mondiale en donnant son nom au procédé de métallisation connu depuis sous le nom de "Schoopage".

❖ Le développement

Dès 1930, la métallisation prit un essor considérable aux U.S.A, où des résultats encourageants furent obtenus sur des dépôts d'épaisseurs importantes, permettant d'envisager de rapporter du métal sur des pièces mécaniques usées. C'est le début de la technique dite de rechargement.

Dans les années 50, le développement du procédé a été caractérisé par l'étendue des matériaux projetés. Beaucoup de nouveaux alliages en métal ont été développés, en particulier pour l'utilisation dans les revêtements durs, ainsi que la pulvérisation de la céramique.

Jusqu'aux années 60, les deux procédés, par fil et par poudre, ont évolué séparément. Si le premier, porte le nom de "schoopage", le second porte couramment le nom de "Schori" dérivé du nom de Fritz Schori qui développa ce concept au début des années 30 [18.19].

Pour résumer l'historique de la projection thermique en quelques points importants voici les dates les plus essentielles (voir la *figure 1-5*) :

- 1914 : Utilisation de la projection à l'arc électrique par M.U. Schoop.
- 1951 : Invention de la projection plasma.
- 1955 : Naissance du canon à détonation.
- 1975: Création de la projection plasma sous faible pression de gaz inerte.
- 1983 : Début de la projection à la flamme rapide (HVOF).
- 1991 : Emergence de la projection plasma sous gaz neutre à pression supérieure à la pression atmosphérique (système CAPS).
- 1993 : Prise de brevet du procédé PROTAL.
- 1995 : Développement de la projection froide ou "cold spray" [20].

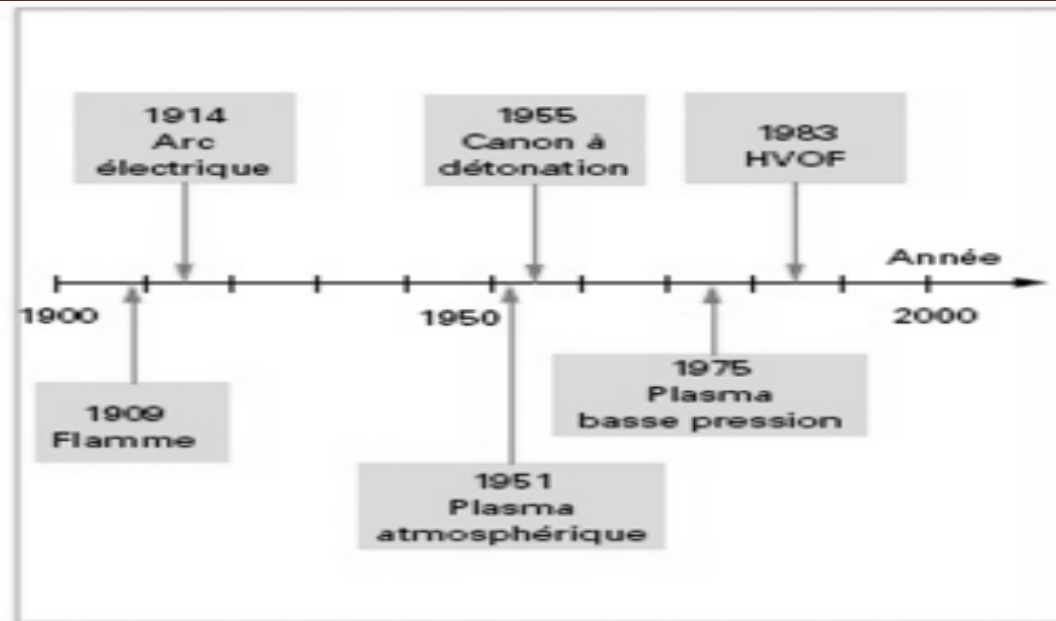


Figure I-5 : Evolution de la projection thermique avec le temps [18].

2.2.2. Place de la projection thermique parmi les traitements de surface

Vu l'existence de divers revêtements susceptibles de conférer de nouvelles propriétés aux surfaces qu'ils recouvrent, l'utilisateur est confronté à divers problèmes tels que :

- Le choix de type de revêtement qui se fait en fonction du type de sollicitations mécaniques et en fonction de l'environnement et des impératifs techniques (agressivité du milieu, maintenance...etc.)
- Le choix du procédé permettant le traitement qui se fait en tenant compte d'une jonction technico-économique.

Parmi les techniques les plus utilisées ; la projection thermique accapare une place primordiale, qui présente le plus de souplesse quant :

- Au choix du couple substrat-dépôt,
- Au choix du procédé,
- A la taille des pièces à traiter [22].

2.2.3. Principe de fonctionnement

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie (voir la figure 1-6).

- La surface de base ne subit ainsi aucune fusion.
- L'adhérence du dépôt est mécanique [21].

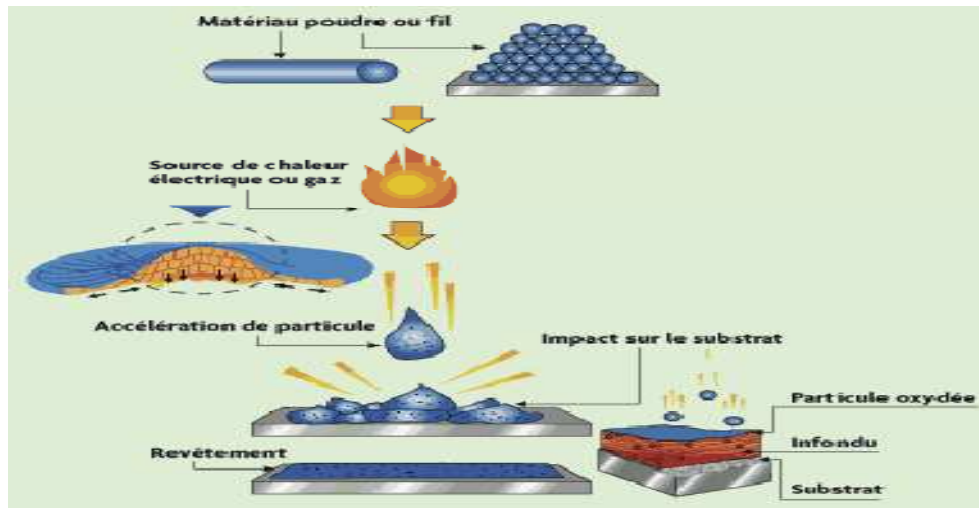


Figure I-6: Le procédé de projection thermique [21].

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc). Il est pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce courant gazeux peut être constitué soit par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote, mélangé aux gaz provenant de la combustion (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz de ceux-ci (plasma d'arc).

Les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse :

- Environ 100 à 200 m/s pour les pistolets à gaz.
- De l'ordre de la vitesse du son pour les pistolets à plasma d'arc [22].

Les particules vont s'écraser sur le support placé à une distance convenable. Au moment de l'impact sur le substrat les particules se présentent à l'état pâteux, au moins en périphérie.

Les particules fondues doivent être à une vitesse assez grande pour qu'elles puissent s'étaler sur le support et y former un dépôt par empilements successifs (voir la figure I-7) ; la source d'énergie doit donc être suffisamment puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau (transfert thermique) et délivrer un jet gazeux susceptible de véhiculer les particules (transfert cinétique) [23].

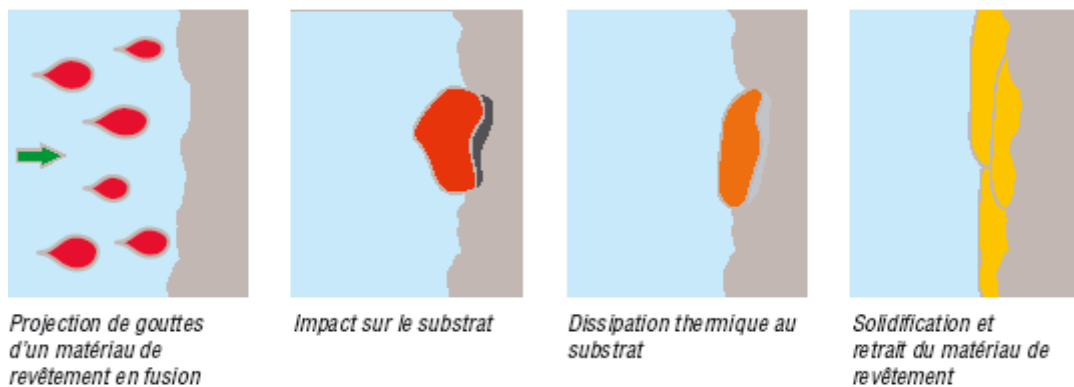


Figure I-7 : Principe de formation des couches [23].

Deux sources d'énergie sont employées pour déposer les matériaux suivant la technique de projection thermique : la flamme ou le courant électrique.

La figure I-8 regroupe les différentes sources d'énergie en projection thermique.

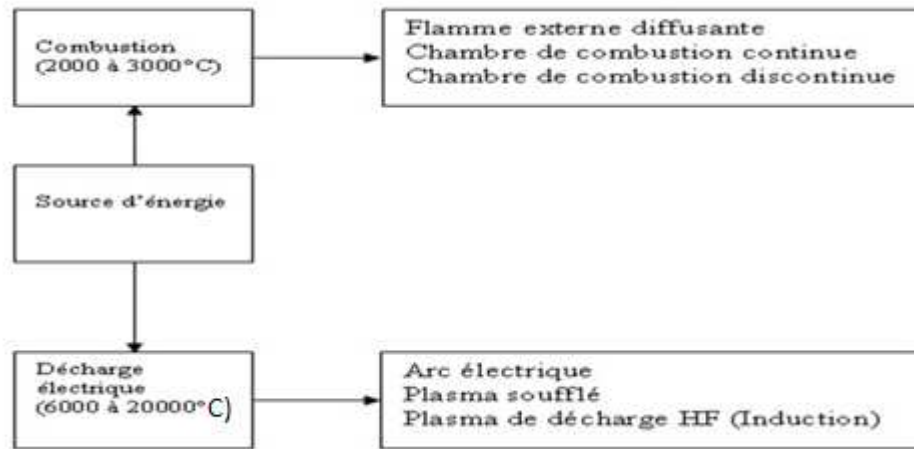


Figure I-8 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique [23].

2.2.3. Types de projection thermique

Selon la nature du matériau projeté (poudre ou fil), le type de source d'énergie (flamme ou électricité) ainsi que la technologie utilisée, les processus de projection thermique sont généralement scindés en trois classes : la projection à la flamme, la projection à l'arc électrique et la projection plasma soufflée comme le montre la figure I-9.

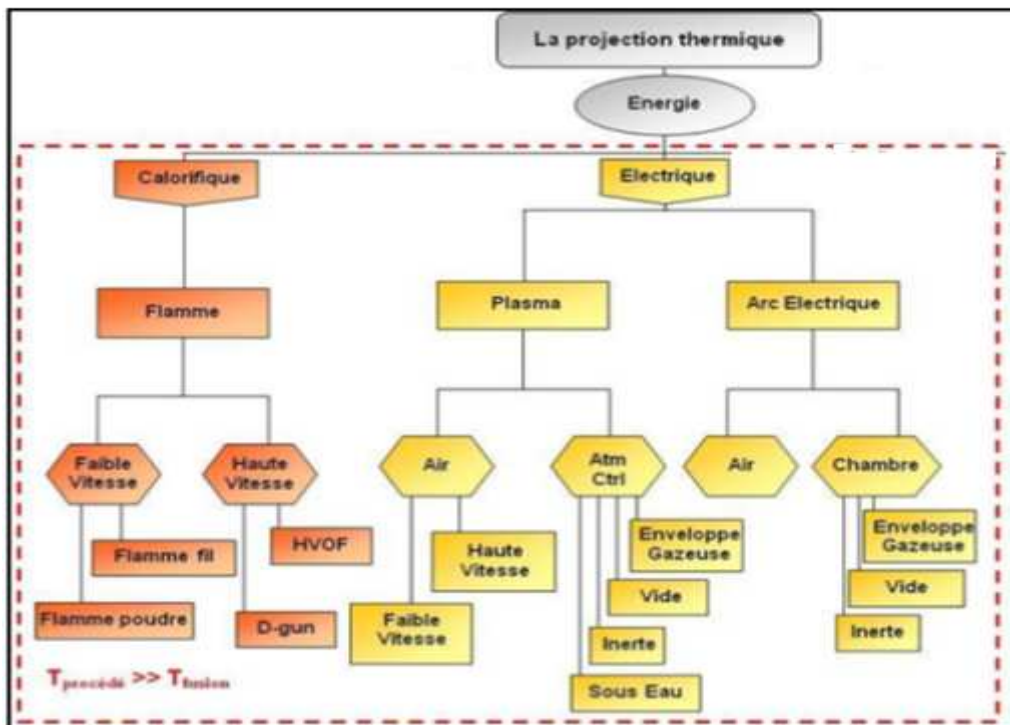


Figure I-9 : Organigramme de la projection thermique [24].

2.2.3.1 Projection à la Flamme

Ce procédé utilise la combustion d'un gaz pour projeter le matériau d'apport sur le substrat. En général, on utilise un chalumeau. Cette technique est très simple et très répandue dans l'industrie, mais elle est limitée en température et en vitesse de projection. Il est possible de projeter indifféremment le matériau sous forme de poudre ou de fil.

La source de chaleur est ici la combustion des gaz. La température de la flamme varie de 2800°C à 3150°C. Cette méthode est adaptée à la projection de matériaux à bas point de fusion.

Le moins onéreux et le plus facile d'emploi est la torche à gaz. La poudre tombe, ensuite elle est entraînée par les gaz de combustion vers la flamme où elle est fondue. La flamme assure aussi le chauffage du substrat.

Les poudres utilisées sont des alliages à base de Ni ou de Co avec du chrome, du bore ou du silicium et parfois des carbures. [25]

a) 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 (*figure I-10*) [26].

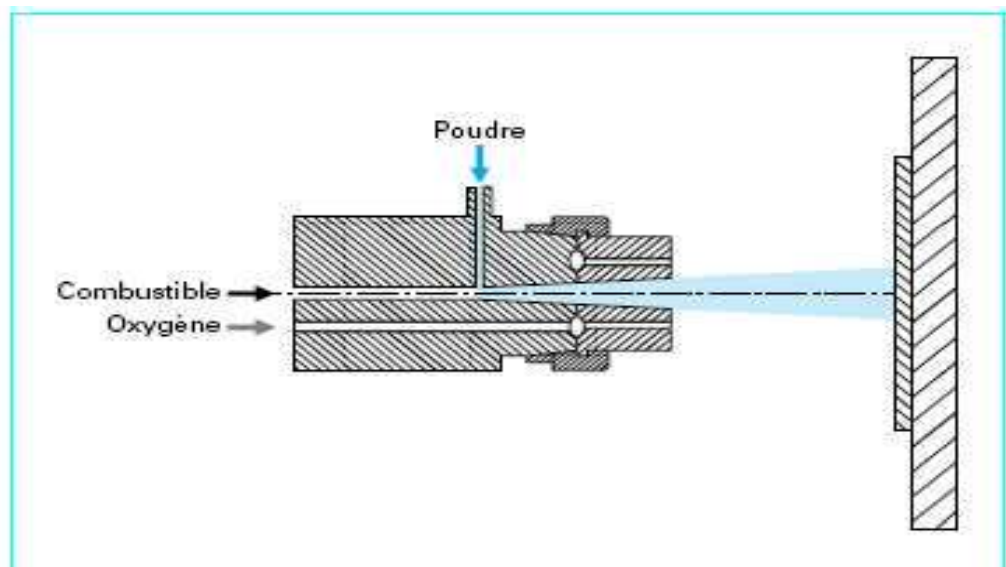


Figure I-10 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [18].

Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

- À réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion.
- À réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

❖ **La projection**

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C, il en résulte que les températures atteintes par les particules projetées ne dépassent pas les 2000°C environ (la chaleur de la flamme assure d'une part la fusion de la poudre et d'autre part le chauffage du support).

La vitesse des particules projetées est faible (30 m/s) et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue). Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat. Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles, la refusion après projection permettant d'améliorer l'adhérence et de diminuer la porosité. La projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion de céramiques ou de polymères est également possible [18].

❖ **Les dépôts**

En raison de la faible vitesse des particules, les dépôts obtenus présentent généralement une faible adhérence (20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20%) par rapport à ceux obtenus avec d'autres techniques de projection.

Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles (alliage à base de nickel ou cobalt contenant des éléments tels que le bore et/ou le silicium et chargés éventuellement en carbures), qui sont réchauffés à 1150°C après dépôt. Cette opération supplémentaire permet d'améliorer l'adhérence, d'éliminer en partie les oxydes et de diminuer la porosité.

Les dépôts à base d'acier, d'alliages à bas point de fusion ou de polymères sont également réalisables par le procédé de projection flamme-poudre [26].

❖ **Les utilisations**

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. D'un coût d'investissement peu élevé, il permet de résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées [26].

❖ Les avantages

Les 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 peuvent aussi être réalisés par projection flamme [24].

b) La projection flamme-fil

La projection flamme fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par le suisse Schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils métalliques. L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûleur. Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisait et propulsait le métal fondu. La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu [23] comme pour le procédé à flamme-poudre, son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et à le projeter sur le substrat (*la figure 1-11*). Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu [26].

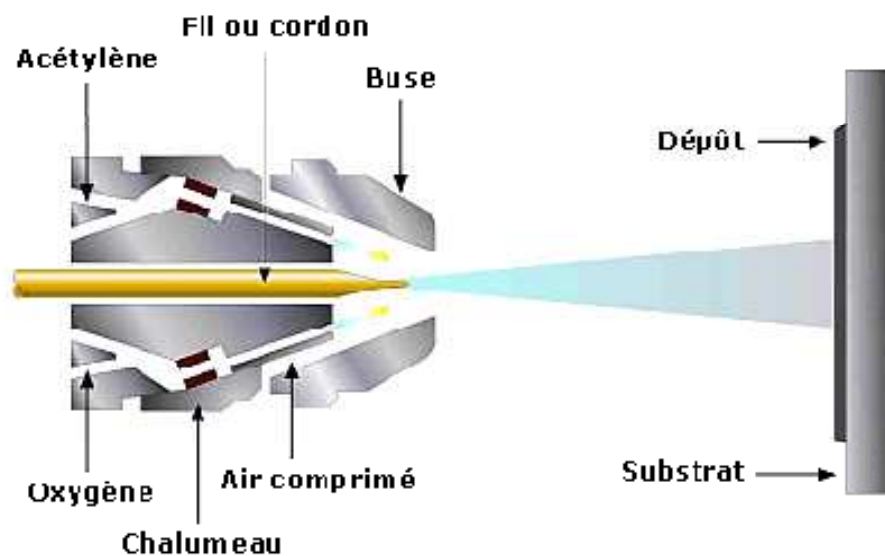


Figure 1-11 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [26]

Le pistolet de projection est équipé d'un chalumeau oxy-gaz de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion, auxquels s'ajoute un vecteur d'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue du fil et à la propulsion des gouttelettes fondues sur le substrat.

Il se compose de deux parties distinctes:

- la partie chalumeau: qui utilise des gaz de combustion identiques à ceux utilisés en flamme-poudre, soit oxygène + gaz combustible (généralement acétylène ou propane). Elle se compose d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air.

- la partie entraînement du fil: qui peut être animée soit par un système à turbine, soit par un moteur à air comprimé, soit par un moteur électrique. Ces différents types d'entraînement, communiquent un mouvement de rotation à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la buse à gaz du chalumeau. Suivant le diamètre du fil, le serrage des molettes peut être obtenu par un système à ressort ou par une pression d'air. Dans un tel dispositif, la vitesse d'avance du fil doit pouvoir être réglée en fonction de son diamètre, de sa nature (température de fusion) et de la puissance de chauffe de la flamme. Dans le cas d'entraînement par turbine à air comprimé, il est nécessaire de passer par un réducteur de vitesse, de manière à communiquer aux molettes un mouvement suffisamment lent.

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés, et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de baguette, à plus de 30 kg/h pour des fils anticorrosion tels que le zinc.

Cependant, les types d'entraînement cités ci-dessus s'avèrent insuffisants pour effectuer des dépôts importants, ou lorsqu'on est tenu à des réglages précis de défilement lent, pour l'utilisation de cordons ou baguettes en matériaux réfractaires par exemple. Pour réaliser des rechargements massifs, généralement effectués avec des gros fils rigides qui nécessitent de gros efforts d'entraînement, on utilise des moteurs électriques capables de tirer des fils jusqu'à 5 mm de diamètre. Ces moteurs sont généralement dissociés du pistolet et reliés à ce dernier par un flexible [18.19].

❖ La projection

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C et la température à l'extrémité du fil ou de la baguette peut atteindre 95% de la température de la flamme. Ce qui permet de projeter des céramiques.

La vitesse des particules est plus élevée que pour la flamme poudre, en raison du vecteur d'air comprimé, puisqu'elle atteint 150 m/s. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de 1 à 25 kg/h, avec un pistolet portatif (suivant la nature et le diamètre du fil), mais peut aussi déposer jusqu'à 40 kg/h avec un pistolet fixe en rechargement massif [26].

❖ Les dépôts

Tous les matériaux peuvent être projetés avec ce procédé, qu'ils soient tréfilables (sous forme de fil) ou non (sous forme de baguette), ou en poudre (sous forme de cordon). Ces différents conditionnements, permettent des dépôts de toutes sortes et la possibilité d'utiliser un pistolet à flamme-fil pour projeter des alliages auto fusibles.

L'accrochage du dépôt sur le support se fait de façon mécanique. Mais après une projection d'alliages auto fusibles, il est possible de refondre le dépôt afin de le lier métallurgiquement à son support [26].

❖ Les utilisations

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. Il permet de résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées. C'est le procédé le plus utilisé en anticorrosion pour la projection de zinc, de zinc-aluminium ou d'aluminium [26].

❖ Avantages et désavantages

Ses avantages sont qu'il est d'un investissement faible, il est facile d'utilisation en permettant l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier. Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtements à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence [24].

c) Projection avec haute vitesse HVOF

C'est au début des années 80, que **Browning** et **Witfield**, en utilisant la technologie des moteurs de fusées, ont développé un nouveau procédé de projection thermique pour les poudres. Cette technique à flamme, dite "supersonique" (comme le canon à détonation), mais qui utilise le principe de la "déflagration", fut désignée sous le nom de HighVelocityOxy/Fuel (H.V.O.F).

Le principe de cette technique est basé sur la combustion de gaz. La flamme générée est accélérée dans une tuyère adéquate (*figure 1-12*). Les techniques oxy-fuel se distinguent par le type de mélange comburant-combustible utilisé :

- HVOF : comburant dioxygène et combustible propane (C₃H₈), propylène (C₃H₆), éthane C₂H₄, acétylène (C₂H₂, si la pression est inférieure à 1 MPa), tétrène ou hydrogène.
- HVOF : comburant air comprimé et combustible kérosène (C₁₂H₂₃) [24].

Le système HVOF se compose d'une chambre de combustion, d'une tuyère de Laval et d'un canon. C'est la combustion qui génère les hautes températures et pressions.

Elle peut avoir lieu directement dans la partie convergente de la tuyère ou dans une chambre de combustion située en amont. En sortie de tuyère, le gaz est dans un état très expansé et possède une pression très en dessous de la pression atmosphérique. Afin de compenser ce différentiel, le gaz subit une série de compressions obliques et d'ondes de détente appelés chocs diamants. Cette alternance de sections de haute et basse pression correspond respectivement à des zones de température élevée et vitesse faible puis inversement.

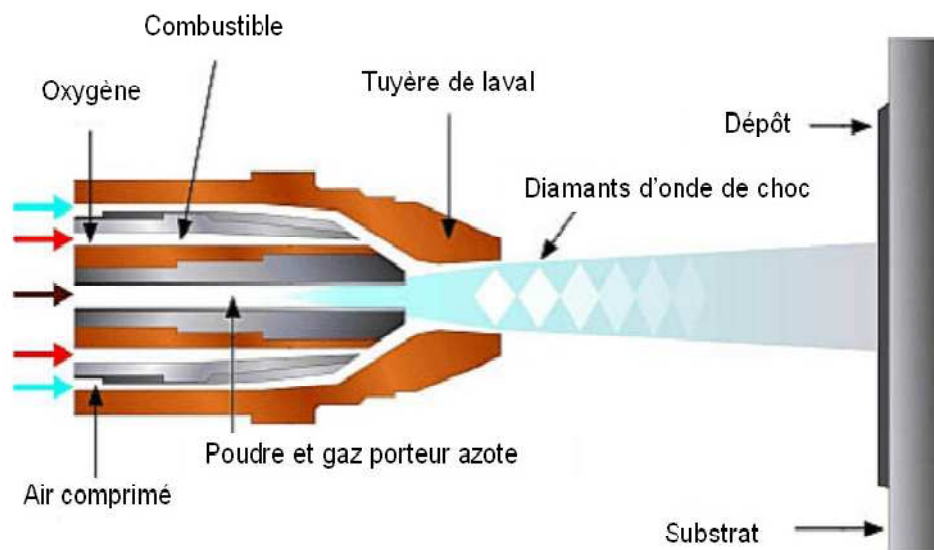


Figure I-12 : Schéma du procédé HVOF [5].

Le matériau à projeter se présente généralement sous forme de poudre. Il est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300 – 600 m/s

Les principales applications de ce procédé sont la projection de cermets (WC-Co, Cr3C7-Co ou NiCr), de métaux, d'alliages et d'alliages auto fusibles.

Le procédé HVOF travaille à une température relativement basse et à une grande vitesse de projection de poudre, conduisant à une amélioration marquée des dépôts [24].

❖ Applications

Ce procédé est principalement utilisé pour projeter des métaux (Inox, Chrome, Molybdène), des alliages de métaux, des alliages auto-fusibles, des carbures et des cermets ou des céramiques. Les applications sont les protections anticorrosion et anti-usure, avec la possibilité de réaliser des dépôts de fortes épaisseurs (en plusieurs passes), dont la densité obtenue approche la densité théorique du matériau d'apport [26].

d) Projection A détonation

✓ Le canon à détonation "D-GUN"

Cette technique de projection inventée au début des années 50 par **Gfeller** et **Baiker** (Union Carbide) est internationalement connue sous l'appellation de "D-Gun". Alors que la projection par flamme et le procédé HVOF utilisent le principe de la "déflagration", le procédé-Gun fonctionne selon le principe de la "détonation" (d'où la lettre "D").

❖ Fonctionnement

Cette technique consiste à introduire le matériau d'apport sous forme de poudre, dans un tube de 25 mm de diamètre et 1 mètre de long, fermé à une extrémité, en même temps que le mélange gazeux de combustion. Ce mélange est généralement constitué d'Oxygène et d'Acétylène en quantités égales, qui détone grâce à une étincelle créée par un dispositif d'allumage. Les gaz brûlés sont ensuite balayés par de l'Azote et les gaz explosifs frais réinjectés à la fréquence de 4 à 10 allumages par seconde (*figure 1-13*).

Les arrivées des gaz sont commandées par des électrovannes dont les temps et durées d'ouverture sont prédéterminés. La poudre est fondue et éjectée à très grandes vitesses, près de 3 km/s par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa et une température au-dessus de 4000°C. Le régime de projection de ce système est discontinu [26].

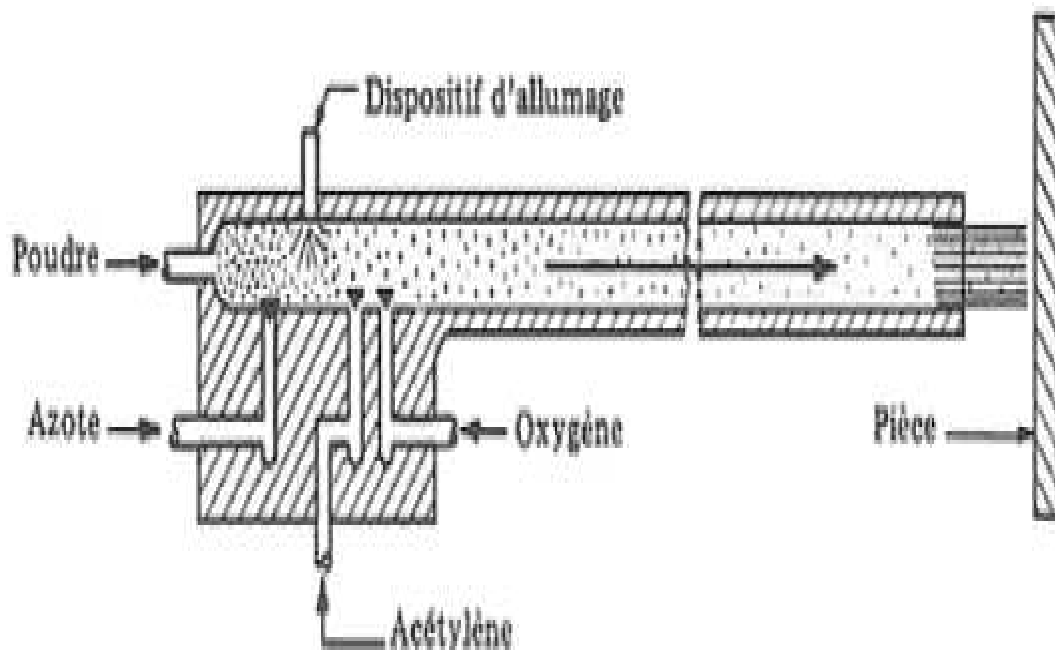


Figure 1-13: Schéma de principe du fonctionnement d'un canon à détonation [26].

❖ Applications

Le canon à détonation permet d'obtenir des dépôts très denses, avec une adhérence élevée (souvent supérieure à 80 MPa) et une faible rugosité ($R_a = \text{env. } 3\mu$). Les taux de dépôt sont compris entre 2 et 5 kg/h. Il est cependant peu répandu du fait de la complexité et du prix du matériel.

Les revêtements par canon à détonation sont réservés aux pièces techniques nécessitant une qualité de dépôt optimale. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de chrome (avec ou sans addition de cobalt) les carbures de tungstène (avec ou sans nickel), les oxydes de chrome ou d'aluminium, les cermets ou les céramiques.

✓ Canon à détonation "FARE-GUN"

Il diffère du D-Gun décrit ci-dessus, par son mode d'alimentation de la poudre et la nature des gaz utilisés. Dans le Fare-Gun, la poudre est alimentée sous forme d'un ruban à capsules, dont lesquelles la quantité de poudre a été dosée pour une explosion. Les risques de pollution des mélanges ou pertes de poudre sont ainsi éliminés.

Les gaz employés pour le mélange détonant sont le propylène et l'air, alors que l'azote est utilisé pour percer les capsules et introduire la poudre dans la chambre d'explosion. Le cycle d'amorçage est de 1 à 5 par seconde. Les dépôts sont très denses et très adhérents sans porosité ouverte.

L'avantage particulier de ce procédé est que contrairement au D-gun, il ne nécessite pas un cadre particulier et peut être utilisé dans un environnement identique à celui d'un plasma d'arc.

Cet appareil entièrement automatique, peut projeter des matériaux identiques au D-Gun, ainsi que des alliages métalliques tels que Nickel-chrome-aluminium ou Nickel-aluminium [26].

2.2.3.2. Projection à l'arc électrique

a) Projection par arc fil

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils dégageant une énergie thermique importante d'environ 6000°C, variant selon le matériau utilisé et l'intensité choisie, ce qui fait fondre le métal des fils, un jet d'air comprimé situé dans l'axe du point de création de l'arc, pulvérise le métal fondu sur le substrat (*figure 1-14*).

Ce procédé diffère du procédé thermique à flamme du fait qu'il n'emploie aucune source de chaleur extérieure pour la combustion du fil d'apport.

Les deux fils sont chargés électriquement avec des polarités opposées et alimentés ensemble pour maintenir un arc constant. [26]

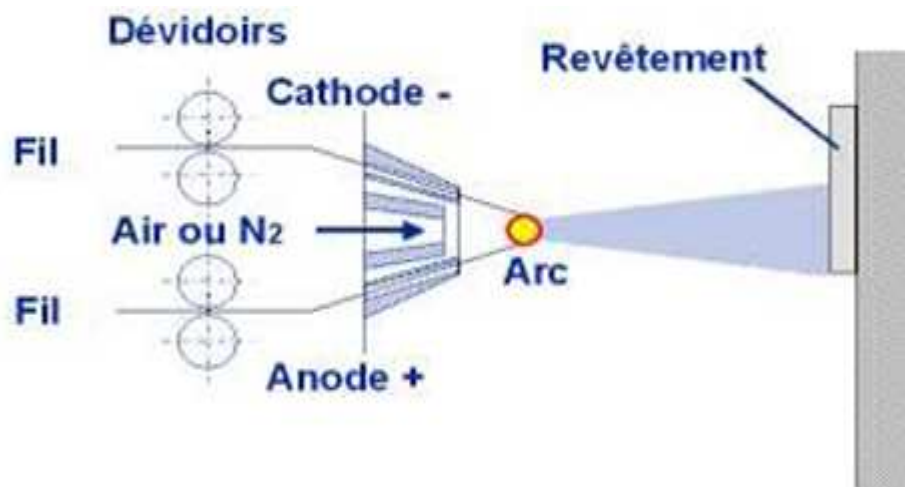


Figure 1-14 : Principe de fonctionnement d'une Torche à arc électrique [27].

Son développement est axé sur les deux caractéristiques à améliorer qui sont la taille des particules et l'oxydation des dépôts, due au transport des particules par de l'air, remplacé par un gaz neutre.

Les matériaux projetés doivent être conducteurs. Les plus fréquemment utilisés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre, le molybdène et les aciers. Le développement des fils fourrés avec des alliages tels que NiCrAl ou NiMoAl, des fils chargés en carbure de chrome ou des composites, permet de nouveaux types de dépôts.

Le fait que les matériaux à projeter doivent être conducteurs constitue aussi un frein à l'utilisation de cette méthode de projection [27].

Le pistolet arc-file est essentiellement constitué de deux parties distinctes:

- la première sert à l'entraînement des fils

Les fils, conditionnés en bobines, sont tirés au travers de gaines souples, par des molettes entraînées par une turbine à air pour les appareils portables, ou par un moteur électrique pour les appareils fixes montés sur des machines. Dans le cas de fils très rigides, ou de grandes distances entre le pistolet et les bobines (supérieures à 5m), il est nécessaire d'adjoindre un système d'entraînement des fils par poussée à l'entrée des gaines. Ce type d'équipement est communément appelé "poussé-tiré" [26].

- la seconde assure la fusion et la projection du métal fondu

A l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant, d'une part, le positionnement du fil avant son entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils. Une buse située derrière le point d'intersection des fils, dirige un flux de gaz comprimé à grande vitesse sur l'extrémité des fils en fusion, et propulse le matériau atomisé sur le substrat [26].

❖ Caractéristiques

La température de l'arc, d'environ 6000°K dans l'air à pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés. Ceci peut entraîner une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. Cependant, cette dernière peut aider à créer des zones d'interaction métallurgiques dans le dépôt ou à l'interface dépôt/substrat et des zones de diffusion, améliorant ainsi sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts.

❖ Utilisations

La projection par arc électrique présente un meilleur rendement de dépôt par rapport aux autres procédés de projection, mais elle nécessite des matériaux conducteurs électriques et tréfilables. La plupart des matériaux métalliques tels que le zinc, le cuivre, l'aluminium, le bronze, l'acier, le molybdène, ainsi que de nombreux alliages peuvent être projetés par cette technique.

En raison d'une température d'arc élevée, la variété des matériaux métalliques déposables n'est limitée qu'à la fabrication des fils. Néanmoins, l'emploi de fils fourrés ductiles, permet la projection d'alliages complexes et de composites techniques. Les domaines d'applications sont l'anticorrosion et les rechargements, surtout pour les dépôts durs.

❖ Avantages

L'avance des fils à vitesse constante permet la projection en continue avec des débits de matières élevés (jusqu'à 40 kg/suivant l'intensité et le diamètre des fils), ceci en dépit du caractère discontinu qu'induit la création et l'extinction de l'arc lors de la formation et de l'atomisation des gouttelettes. L'utilisation d'un gaz d'atomisation secondaire (gaz de gainage) permet une meilleure canalisation du jet des particules et l'augmentation de leurs vitesses d'impact, ce qui améliore les propriétés du dépôt. Il permet aussi de réduire l'entraînement de l'air ambiant et l'oxydation du dépôt.

Les dépôts obtenus avec ce procédé sont très adhérents (3 fois plus que la projection à la flamme), du fait des points où le revêtement est soudé au support par diffusion. Cette technique permet de réaliser des dépôts dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 3 mm. Son coût de mise en œuvre est relativement peu élevé par rapport aux procédés à la torche plasma ou à la flamme en raison d'une conception simple et nécessitant une maintenance réduite [26].

b) La projection par plasma

Le plasma est considéré comme le 4ème état de la matière.

Solide | liquide | gaz | plasma
→

La première utilisation industrielle des torches à plasma d'arc date de 1905 pour la production d'oxydes d'azote selon le procédé Birkeland et Eyde. Cette application qui a été arrêtée en 1920 avait une puissance totale de quelques centaines de mégawatts. Ensuite, en 1939, la société Hüls a développé des torches de 8,5 mégawatts pour la production d'acétylène, à partir d'hydrogène et de méthane. Cette installation est toujours en fonctionnement [24].

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

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

Pour la projection thermique, deux propriétés conditionnent la vitesse et la température des particules projetées :

- la conductivité thermique qui détermine les transferts plasma particules et donc l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat ;
- la viscosité qui permet de diminuer les entrées d'air dans le jet plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules [24,27].

La source de chaleur utilisée est un plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène. Le gaz, qui ne se trouve plus sous sa forme gazeuse, mais à l'état plasma, produit alors de hautes températures. La particularité de ce système de projection, est la très forte constriction imposée à l'arc, qui permet d'atteindre dans le plasma des températures très élevées, de l'ordre de 10000 à 15000°K. Tous les matériaux y compris les plus réfractaires, peuvent ainsi être fondus.

L'expansion du flux gazeux permet d'atteindre en sortie de tuyère des vitesses d'éjection très élevées, puisqu'elles peuvent dépasser la vitesse du son. Elles sont comprises entre 800 et 1200 m/s, suivant la densité du plasma et la nature des gaz. Ce qui permet d'obtenir une bonne fusion et un bon étalement des particules à l'impact, qui elles, sont projetées à des vitesses de l'ordre de **200 à 250 m/s** sur le substrat [26,27].

La figure 1-15 explique le principe de fonctionnement du procédé plasma.

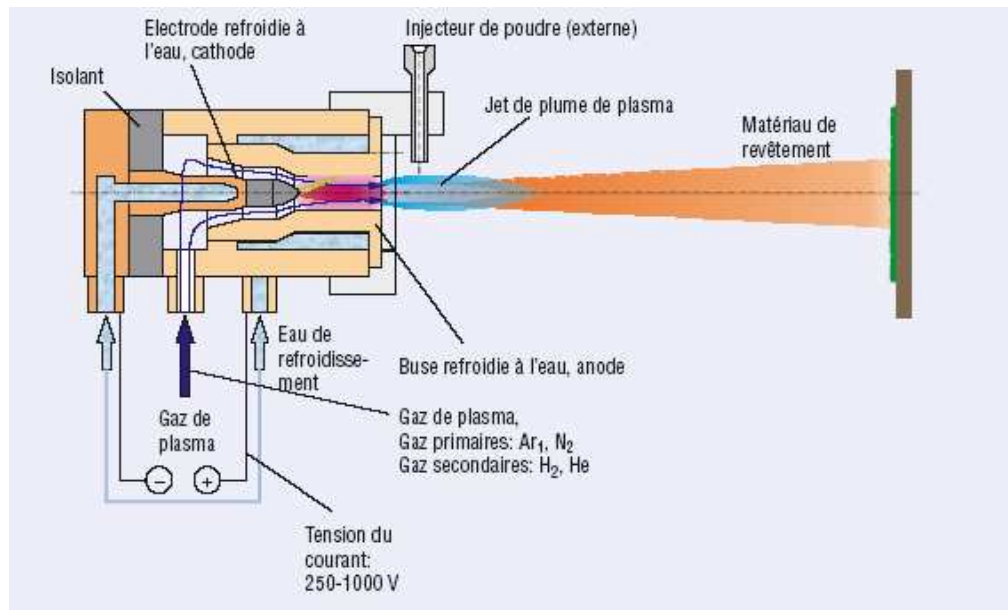


Figure 1-15 : Schéma du procédé plasma soufflé [24].

❖ Fonctionnement

La torche plasma est un appareil dans lequel on force un gaz à passer au travers d'un arc électrique étranglé, créé par une décharge haute fréquence, établi entre une anode et une cathode, refroidies par une circulation d'eau.

L'anode cylindrique est évidée au centre pour recevoir la cathode et servir de tuyère d'éjection à la colonne plasma. Le gaz injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique ou il est ionisé et est ensuite propulsé par la tuyère cathodique sous l'état de plasma.

❖ Utilisation

Compte tenu des températures atteintes dans les jets de plasma, il n'y a pas de limitation quant au point de fusion des matériaux. Cette technique permet de projeter une grande gamme de matériaux: métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certaines conditions, les polymères. Cependant, une différence de 300°K entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour éviter qu'il ne se sublime. L'utilisation du plasma sous vide partiel ou en atmosphère contrôlée, permet de maîtriser certains de ces problèmes.

❖ Avantages

Le principal avantage de la projection par plasma, est donc la possibilité de pouvoir projeter des matériaux très réfractaires et d'obtenir des dépôts très durs comme avec la céramique, destinés à la protection contre l'usure ou la corrosion et à la protection thermique.

❖ Applications

Les secteurs d'applications sont variés. On retrouve la projection plasma dans les domaines de l'aéronautique (civil ou militaire), de l'aérospatiale, de l'énergie (pile à combustible, pétrochimie), des mines, de l'impression et de la pâte à papier, de l'industrie du verre, de l'automobile, dans le secteur médical et dans la protection des chocs thermiques comme les barrières diélectriques [26].

2.2.3.3. Comparaison des procédés

Le tableau 1-12 ci-dessous récapitule les caractéristiques particulières à chaque procédé de projection, sachant que le choix doit se faire en tenant compte du résultat à obtenir et des paramètres énoncés.

Tableau 1-12 : Principales caractéristiques des différents procédés [26]

Caractéristiques	Flamme poudre	Flamme fil-cordon	Arc électrique	Plasma ASP*	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique	Plasma	Flamme	Flamme
Température de la source chaude (°C)	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse d'écoulement (m/s)	80 - 100	100 - 300	200 - 300	300 - 1200	400 - 2000	900 - 2000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	150	200	700	950
Forme du produit d'apport	Poudre	Fil-cordon	Fil	Poudre	Poudre	Poudre
Taux horaire de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Taux d'oxyde (%)	6 - 12	4 - 8	1 - 10	1 - 5	0,5 - 2	0,1 - 0,5
Rendement moyen* (%)	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux de porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Épaisseur déposée (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemples de matériaux d'apport	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Fils fourrés	Métaux Alliages Céramiques	Métaux Alliages Cermets	Cermets Céramiques

ASP = Air Plasma Spraying, (projection dans l'air ambiant).
* Rendement moyen = Pourcentage du matériau d'apport projeté qui adhère au substrat.

2.2.4. Formation et structure d'un revêtement

La formation d'un dépôt est le résultat d'une combinaison du phénomène d'écrasement, de solidification rapide des particules fondues sur le substrat, et du balayage de la surface à traiter. Les particules projetées en s'écrasant sur le métal de base forment une juxtaposition de couches qui donnent l'allure générale d'un dépôt obtenu par projection thermique [18].

Ce mécanisme d'écrasement est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles-mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion), et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température).

Les dépôts sont généralement poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes, des particules non fondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur) (figure 1-16).

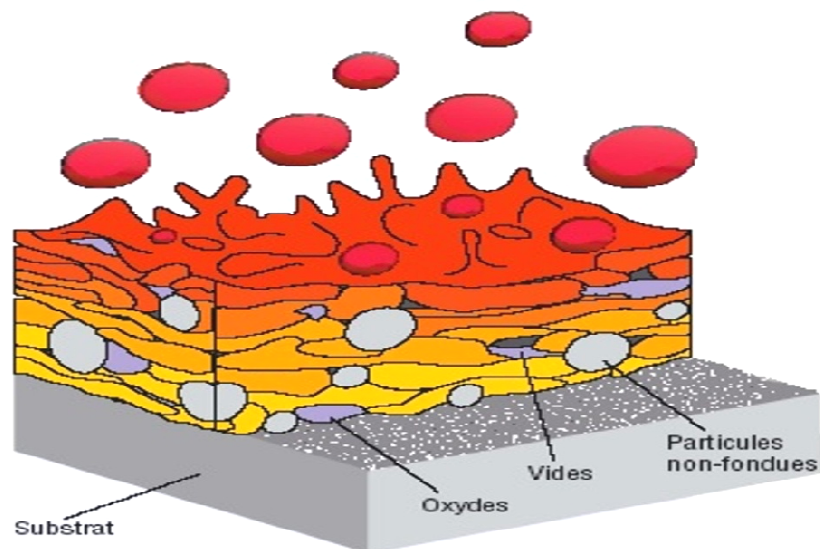


Figure 1-16 : schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté [23].

2.2.5. Adhérence

Les dépôts projetés adhèrent au substrat par un phénomène mécanique qui exige une préparation soignée de la surface à revêtir. Les particules en fusion épousent plus ou moins bien la rugosité du substrat. L'adhérence varie de 20 à 150 MPa. Dans le cas où elle s'avère insuffisante, on utilise des sous-couches d'accrochage, parmi lesquelles on peut citer l'aluminure de nickel, le molybdène ou encore les alliages du type Ni-Cr (80/20) [18].

a) Mécanismes d'adhérence

Dans une grande majorité des cas, l'adhérence a un caractère mécanique. Elle est initiée par les particules liquides qui tombent sur les pics de la surface du substrat activée. Les particules se transforment en lamelles qui serrent les pics en se solidifiant. On appelle parfois ce mécanisme l'**ancrage mécanique**.

L'adhérence d'un dépôt au substrat se réalise dans les endroits où les lamelles sont en contact avec le substrat. Or ni les lamelles fleurs ni les lamelles crêpes ne sont en contact avec le substrat sur toute leur surface. L'aire de contact correspond à 20-30% de l'aire totale d'une lamelle, cette aire est limitée par les oxydes et les pores.

Les paramètres intéressants pour comprendre l'adhérence des dépôts prédits par la théorie sont les suivants :

- la température de contact, T_c , qui s'établit entre la lamelle et le substrat pendant le temps de solidification. T_c dépend des paramètres thermo physiques des matériaux de dépôts et de substrat ainsi que de la température initiale du substrat T_0 .
- le temps de solidification des lamelles.

Dans le cas d'une température de contact supérieure à la température de fusion du substrat, les particules s'incrustent dans le substrat et l'adhérence du dépôt est très bonne.

Pour limiter l'oxydation des lamelles métalliques, on peut utiliser l'une des techniques à atmosphère inerte ou à vide. Les oxydes peuvent se former également par la surface de substrat métallique, pour les éviter, il faut projeter directement après l'activation du substrat après une durée inférieure à une demi-heure.

L'existence de pores est intrinsèque aux dépôts projetés. La porosité dans ces dépôts résulte de la fusion incomplète des particules projetées et d'un contact imparfait entre les lamelles, cependant les pores sont plus petits si les particules sont plus petites. On peut alors améliorer l'adhérence en projetant initialement une poudre plus fine [25].

À l'intérieur des zones de contact, l'adhérence résulte d'un des mécanismes suivant :

a).1 L'interaction physique : par les forces de Van Der Waals, l'énergie de liaison est de 0,01 à 0,1 eV/liaison, cette interaction ne peut exister qu'entre des surfaces très propres, ce qui permet aux atomes de s'approcher à des distances inférieures à 0,5nm.

a).2 L'interaction métallurgique : qui se réalise par :

- **diffusion** : réalisée par les lacunes présentes dans les lamelles en train de se solidifier, la diffusion ne peut avoir lieu que lorsqu'il y a une solubilité réciproque des matériaux de lamelle et de substrat. La diffusion est activée par la température de contact (T_c) et par le temps de solidification.

La diffusion assure une bonne adhérence des lamelles au substrat.

- **réaction chimique** : entre une lamelle et un substrat, l'énergie de liaison chimique est plus grande pour les liaisons covalentes et ioniques (de 1 à 100eV/liaison) que pour les liaisons métalliques (de 0,1 à 10 eV/liaison) [25].

b) *Les contraintes résiduelles*

Les dépôts sur les composantes mécaniques sont soumis aux contraintes de mise en service qui résultent d'un contact avec une autre surface. Ces contraintes ont un caractère tridimensionnel et peuvent mener, à elles seules, au détachement du dépôt.

A ces contraintes s'ajoutent les contraintes résiduelles générées par le procédé du dépôt et par la diversité des matériaux de dépôt et de substrat. Parmi les contraintes résiduelles, on peut situer les contraintes structurales, intrinsèques, thermiques, de trempe et de transformation de phase [24].

$$\sigma = \sigma_{st} + \sigma_i + \sigma_t + \sigma_{tr} + \sigma_{tp}$$

Où :

- | | |
|---|--|
| σ : contraintes résiduelles. | σ_t : contraintes thermiques. |
| σ_{st} : contraintes structurales. | σ_{tr} : contraintes de trempe. |
| σ_i : contraintes intrinsèques | σ_{tp} : contraintes de transformation de phase |

b).1 Les contraintes structurales : provenant de la différence de réseau cristallin entre le dépôt et le substrat.

b).2 Les contraintes intrinsèques : appelées aussi les contraintes de croissance, provenant du processus de croissance du dépôt. Ces contraintes résultent de la modification du volume du dépôt par rapport au volume du matériau monocristallin.

b).3 Les contraintes thermiques : résultent de la différence des coefficients de dilatation thermique du dépôt et de substrat, et de la température à la fin de dépôt et la température ambiante.

b).4 Les contraintes de trempe : résultent du refroidissement rapide d'une lamelle à partir de la température de fusion jusqu'à la température actuelle du dépôt.

b).5 Les contraintes de transformation de phase : qui résultent de la transformation de phase dans les lamelles [25]

Chapitre II:

Technique experimental

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif de projection thermique employé pour l'élaboration des dépôts, les méthodes expérimentales utilisées pour la préparation des substrats, et les différentes techniques d'analyse ainsi que les méthodes d'investigation que nous avons utilisées pour étudier les dépôts.

1. Procédé de métallisation

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de suivre certaines étapes telles qu'une bonne préparation de la surface et le choix des paramètres de projection.

2. Matériaux utilisés

2.1. Les substrats

Les deux alliages d'aluminium de fonderie qui font l'objet de notre étude sont Al-Si 13% et Al fondu à l'ERENAV. Les éprouvettes ayant subi la projection thermique ont une dimension de (5×20×40) mm.

Le tableau II-1 présente la composition chimique de l'alliage AS13.

Tableau II-1 : Composition chimique de l'alliage Al-Si 13% [28].

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Autres
AS13	12.5 à 13.5	<0.27	<0.02	<0.04	<0.04	<0.04	<0.09	<0.09	<0.03 chaque <0.10 total

La composition chimique de l'alliage Al-Si est à base d'aluminium composée de 13% de silicium de 0.30% de fer et de 0.04 de magnésium.

2.2. Le dépôt

Le dépôt projeté est un acier inoxydable 304 de nuance industrielle
« **ProXon 21021 Alliage Ni-Al-Mo** ».

Caractérisé par :

- ✓ Portées mécaniques, rattrapages de côtes.
- ✓ Revêtement anti-usure de faibles et fortes épaisseurs.
- ✓ S'utilise sans couche d'accrochage.
- ✓ Une dureté de 150-165HV10.

3. Le moulage des pièces

3.1. Alliage AS13

A cause de ses propriétés de fonderies, de sa très bonne aptitude au moulage et sa très bonne coulabilité à l'état liquide, l'alliage AS13 peut être moulé en sable, en coquille ou sous pression. Dans notre étude, les alliages d'aluminium sont moulés en sable.

La fusion du métal se fait dans un four électrique, la masse métallique subit un traitement de dégazage, de modification et d'affinage. Et cela en introduisant un produit de dégazage, un produit de modification, ainsi qu'un produit de protection de la surface du bain.

– *Produit pour dégazage*

C'est un produit à base d'azote sous forme de poudre, il est introduit au fond du bain métallique à l'aide d'une cloche à trous à raison de 0,2 à 0,4 % du poids total du bain. La température du métal liquide doit être de 720 °C.

– *Produit de modification et d'affinage*

C'est un mélange de sel de Chlorure de sodium et de fluorure, il est sous forme de poudre fine répandue en surface entre 0,5 % et 1 %. Quand cette poudre devient liquide, on la fait pénétrer dans le bain. La température du métal doit être supérieure à 750 °C.

– *Produit pour la protection du bain*

C'est un produit sous forme de poudre, il est répandu en surface après la fusion complète de la charge à raison de 0,3 % à 1 % du poids total du bain ensuite on procède au décrassage.

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules en sable.

– *Décochage et sablage des pièces obtenues*

Après la coulée, on passe à l'opération de décochage pour tirer les pièces des moules.

Après cela, on procède au sablage pour enlever les grains de sables restants après le décochage.

-Ébarbage

Après le sablage, on procède à l'ébarbage et on prélève nos échantillons en découpant les parties des chenaux solidifiés.

Après le parachèvement des pièces, on a procédé au découpage de ces pièces en éprouvettes de dimension (5x20x40) mm³.

4. Traitement de dégazage

Après l'obtention du substrat, nous avons fait un traitement de dégazage et dans le but d'éliminer au maximum les porosités provoquées lors de la coulée.

Le traitement de dégazage s'est effectué en une durée de 2 heures à une température de 400°C pour les deux nuances de l'aluminium [29].

5. La préparation des surfaces pour la projection

Avant l'opération de projection, la pièce à projeter doit être préparée soigneusement. Pour cela, il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir une propreté et une rugosité en surface de la pièce traitée afin de permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface ainsi créées et d'assurer un bon accrochage mécanique. C'est un facteur prépondérant dans la bonne tenue des dépôts. Cet état de surface est obtenu par meulage.

➤ Le meulage

On a fait le meulage des échantillons à l'aide d'une meule. Cette opération de meulage nous a permis de réduire l'épaisseur de 2 à 3 mm pour avoir la surface striée désirée. Ces stries sont nécessaires pour l'accrochage du dépôt de l'acier sur l'aluminium, il faut donc éviter au maximum les surfaces lisses pour un bon état d'accrochage.

6. Conditions de projection thermique

Pour que la couche projetée s'amalgame le mieux possible avec le métal de base, il faut respecter les paramètres de projection préconisés par le constructeur, résumées dans le *tableau II-2*.

Cette projection a été faite manuellement par le technicien de l'atelier.

Tableau II-2 : Les paramètres de projection.

Pression de la projection	3 bars
Tension du générateur	30 V
Intensité de courant	100 A
Distance de projection	200-250 mm
Angle de tir	90°

7. Protection de l'opérateur

Les risques liés à la chaleur : les flammes atteignent des températures très élevées au voisinage des chalumeaux ou des torches et émettent des rayonnements. Des

gants de protection contre la chaleur (norme NF EN 407) et des lunettes ou masques équipés de filtres plus ou moins foncés suivant les applications (norme NF EN 166) sont les principaux moyens de se prémunir contre ces dangers.

8. Contrôle de la température

Le contrôle de la température s'est effectué au niveau de l'atelier où on a fait la projection thermique. Ce contrôle a été effectué en deux étapes qui sont :

- 1- Un contrôle effectué **avant la projection** pour vérifier avec exactitude la température de préchauffage, (Les erreurs ont été de l'ordre de $\pm 3^\circ\text{C}$).
- 2- Un contrôle effectué **après la projection** pour avoir une idée de la température de nos échantillons après l'opération.

Evidemment, vu la grandeur des valeurs après la projection, nous avons eu recours à un thermomètre infrarouge.

➤ Principe de fonctionnement

Un thermomètre infrarouge est un instrument permettant de mesurer la température de surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit. Un tel thermomètre est parfois appelé à tort thermomètre laser s'il est aidé d'un laser pour viser, ou encore thermomètre sans-contact pour illustrer sa capacité à mesurer la température à distance. On utilise également le terme de pyromètre de manière à exprimer la différence avec un thermomètre à contact classique, puisqu'il mesure le rayonnement thermique émis et non la température elle-même. En connaissant la quantité d'énergie émise par un objet, et son émissivité, sa température peut être déterminée (figure II-1).



La mesure IR est une mesure de surface : le point laser de cet appareil compact indique le point central de la zone circulaire de mesure.

Figure II-1: Thermomètre infrarouge [30].

Schématiquement, le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'infrarouge) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance, contrairement aux autres types de thermomètres comme les thermocouples. Ainsi il est possible de mesurer la température si l'objet est en mouvement, s'il est entouré d'un champ électromagnétique, s'il est placé dans le vide, etc.

Ces thermomètres peuvent être utilisés pour de nombreuses applications comme :

- le contrôle de produits alimentaires sous emballage, à condition de ne pas réaliser de mesures dans les poches d'air ;
- le contrôle de la température d'un four ou d'autres équipements ;
- la vérification d'équipements mécaniques ou de circuits électriques (exemple : armoires électriques) ;
- la détection de zones chaudes lors d'un incendie ;
- le contrôle du réchauffement ou du refroidissement de matériaux avec précision ;
- la détection de nuages pour les télescopes.

9. Métallographie

Généralement, pour établir une étude métallographique il y a 5 étapes à suivre :

- Préparation des Echantillons.
- Enrobage.
- Polissage.
- L'attaque chimique.
- Observation microscopique.

9.1. Préparation des échantillons

Cette étape consiste à couper des échantillons en deux à l'aide d'une micro scie (à la main) afin d'observer la face transversale, nous permettant d'étudier la variation de l'épaisseur du dépôt et l'interface en fonction du temps de projection et de la température de préchauffage du substrat (voir les figure II-2, II-3).

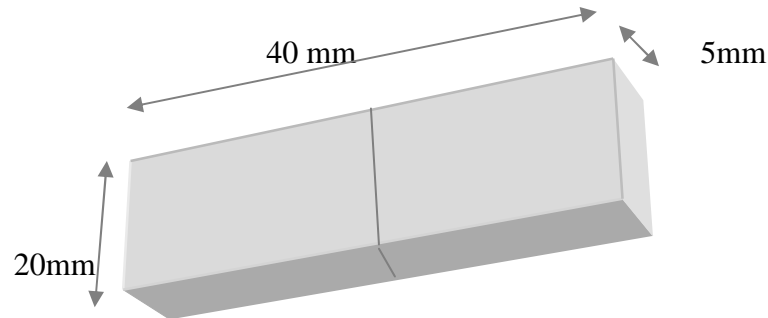


Figure II-2 : Échantillons avant le découpage.

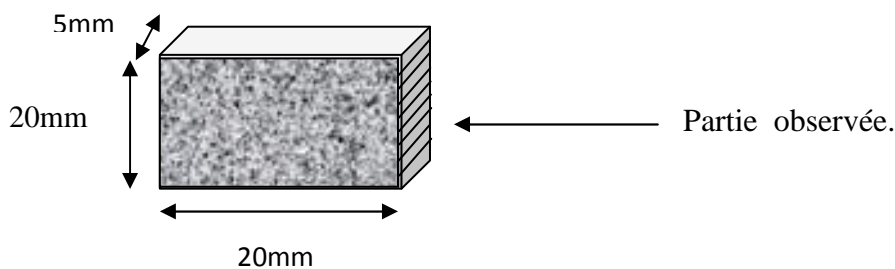


Figure II-3 : Échantillons après le découpage.

9.2. Enrobage

Afin d'éviter toute transformations structurales, il est recommandé d'utiliser des résines d'enrobage à froid.

C'est un procédé de moulage qui consiste à envelopper l'échantillon dans une résine polymère. Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation surtout des échantillons minces et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. L'enrobage à froid se fait dans un moule de résine auto durcissant ; il est utilisé dans tous nos travaux pour éviter toutes les transformations qui peuvent être engendrées par l'échauffement de l'alliage. Il s'effectue dans des moules en plastique dans lesquels est placé l'échantillon au-dessus duquel on verse la résine liquide. Après environ 20 mn la résine se solidifie, l'échantillon est retiré du moule pour passer au polissage.

La figure II-4 présente tous les équipements de l'enrobage à froid.



Figure II-4 : équipements de l'enrobage à froid.

9.3. Polissage

On fait subir aux surfaces à observer des polissages mécaniques dans le but de les rendre planes et exemptes de toutes rayures, graisses ou déformation nuisibles et gênantes. Cette opération consiste à faire passer les surfaces des échantillons à observer sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus faible en commençant avec P.120 puis P.220, P.400, P.600, P.800, P.1000 jusqu'au plus fin P.1200, cela se fait en présence d'un arrosage abondant avec de l'eau pour écarter d'éventuel risques d'échauffement de la pièce et aussi on fait une rotation de la pièce de 90° en passant d'un papier à un autre.

Après toutes ces étapes, les échantillons sont finis à l'aide d'une polisseuse de finition sur un papier feutre imbibé d'une solution d'alumine, on prolonge son action jusqu'à ce que les raies issues du produit précédent disparaissent. Après cette étape nous obtenons l'état miroir désiré.

Le polissage est effectué au niveau du laboratoire du département de génie métallurgie d'école nationale polytechnique d'Alger, avec deux types de polisseuse comme montré sur *les figures II-5, II-6*.

Après le polissage de finition on passe nos échantillons dans un vibreur ultrason pour éliminer les dernières impuretés, et puis on sèche à l'aide d'un séchoir avant de passer à l'attaque chimique.



Figure II-5 : Polisseuse utilisée de type « MECAPOL P200 ».



Figure II-6 : Polisseuse utilisée de type « FOCIPOLE ».

9.4. L'attaque chimique

Après le rinçage et le séchage des échantillons, on passe à l'attaque chimique des échantillons en utilisant une solution de : 33ml de HCl, 33 ml de HNO₃ et 33ml de H₂O. L'attaque se fait pendant 20 secondes [29].

9.5. Observation microscopique

Le but principal de l'observation microscopique est la mise en évidence de la structure des différents échantillons traités.

Comme son nom l'indique, le microscope optique est un instrument permettant l'observation visuelle de petits objets ou détails d'objets, usuellement indiscernables à l'œil nu. Une des propriétés de cet appareil est son agrandissement angulaire, c'est-à-dire la possibilité de fournir une image agrandie d'un objet à étudier.

La seconde propriété clé du microscope est donc sa résolution, dont découlent d'importantes conséquences pratiques, puisque cela implique de travailler avec des optiques de grande ouverture numérique.

Les figure II-7, figure II-8 montrent le microscope utilisé pour l'analyse des échantillons au laboratoire de l'ENP.



Figure II-7 : Microscope de type « OLYMPUS ».



Figure II-8 : Les différents agrandissements du microscope X5, X10, X20,...

➤ Principe de fonctionnement simplifié

L'objet AB est placé devant une lentille convergente L_1 , l'objectif, au-delà de la distance focale ; cela donne une image agrandie $A'B'$; cette image est dans le plan focal d'une lentille convergente L_2 , l'oculaire, afin que l'image se forme « à l'infini » (ce qui est plus confortable pour l'œil, modélisé ici par une lentille convergente) ; la surface jaune montre le faisceau lumineux qui va du point B au fond de l'œil, les traits verts sont les traits de construction permettant de déterminer l'image (figure II-9)

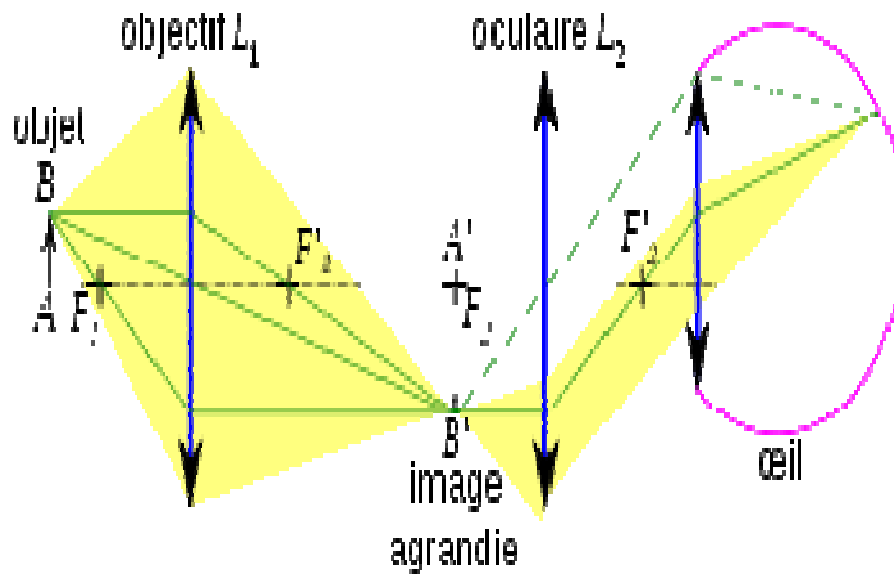


Figure II-9 : Schéma illustre le principe de fonctionnement du microscope.

A l'aide du microscope optique nous avons pris les microstructures. Les photos sont prises par une caméra numérique reliée à l'ordinateur. Le logiciel d'acquisition des photos est le logiciel **Archimed** (figure II-10)

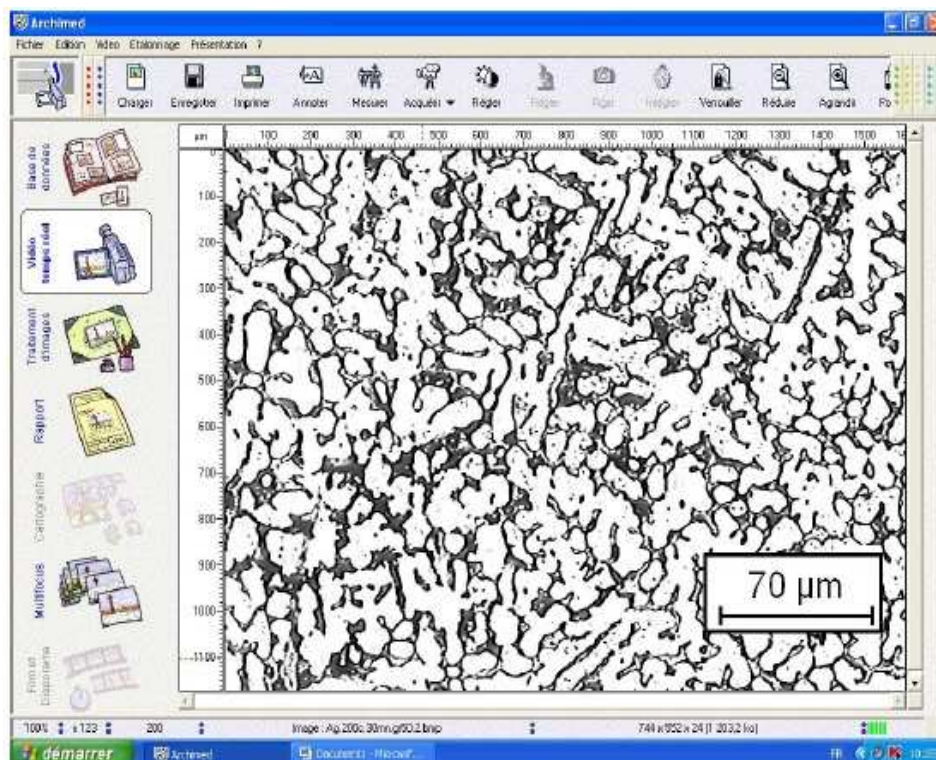


Figure II-10 : Photographie du logiciel d'analyse d'image de travail « Archimed ».

10. Traitement des images

Pour le traitement des images prises grâce au microscope optique, nous nous sommes aidés du logiciel Image J.

L'image J est le logiciel le plus rapide du monde pur programme Java de traitement d'image. Il peut filtrer une image 2048x2048 en 0,1 secondes qui répond à la plupart des exigences en analyse d'images et est programmable en Java sous forme de macro afin d'automatiser une série de tâches. Il est maintenant considéré comme le logiciel tout usage le plus courant pour l'analyse d'images (*Figure II-11*). Il peut analyser différents types d'échantillons en noir et blanc comme les autos radiogrammes, les photos, les gels, les membranes, les négatifs, les diapositives

On a utilisé ce logiciel principalement pour la mesure de la taille du dépôt et de l'interface.

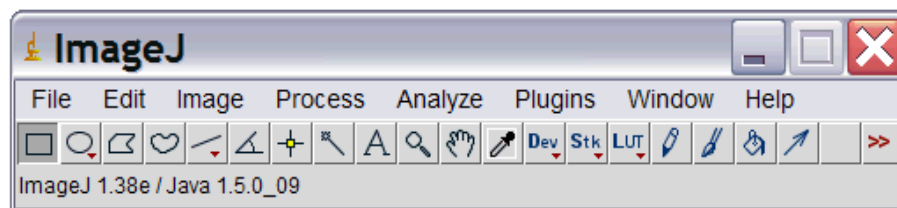


Figure II-11 : Photographie du logiciel de traitement d'image «Image J ».

Chapitre III:

Résultat et interprétation

Après avoir passé en revue les compositions chimiques des matériaux étudiés, les méthodes de caractérisation ainsi que les équipements mis en œuvre, nous présenterons dans le présent chapitre les résultats obtenus et leurs interprétations.

Une étude comparative consistant à projeter une poudre d'acier sur l'alliage d'aluminium AS13 (duplex) et sur l'aluminium pur qui contient quelques impuretés dues à la coulée a été réalisée pour des durées de métallisation variables de 1 seconde à 5 secondes et pour des différentes températures de préchauffage commençant par la température ambiante (25°C, 50°C, 70°C, 90°C, 110°C).

1. État métallographique des substrats (AS13 et l'aluminium)

✓ AS13

L'alliage d'aluminium AS13 présente une structure aciculaire eutectique dont les aiguilles correspondant à la phase β sur un fond de la phase α selon les figures III-1 et III-2 à différents grossissements.

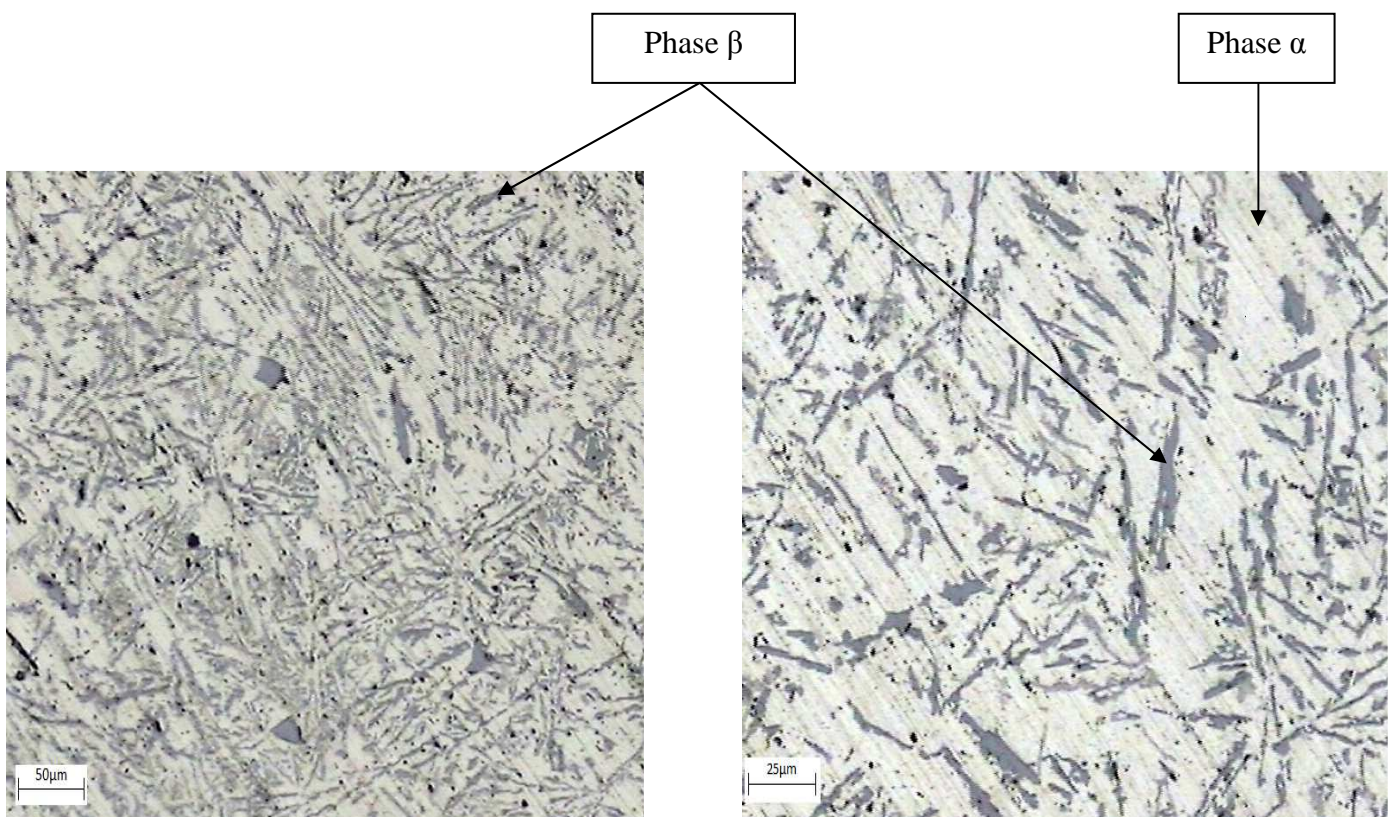


Figure III-1 : Microstructure de l'AS13

Figure III-2 : Microstructure de l'AS13

✓ Aluminium pur

Les figures III-3, III-4 représente la microstructure de l'aluminium pur à différent grossissement. On peut distinguer clairement les grains et les joins des grains.

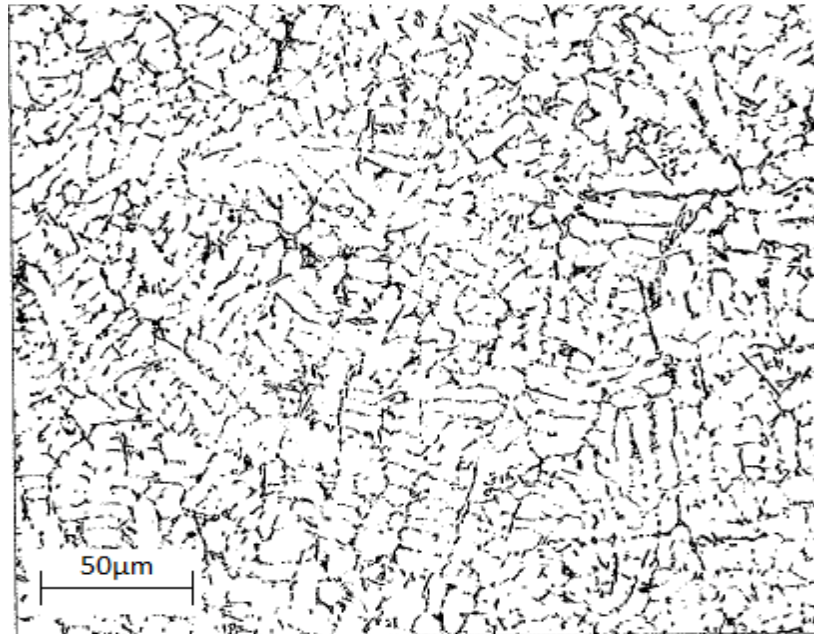


Figure III-3 : Microstructure de l'aluminium

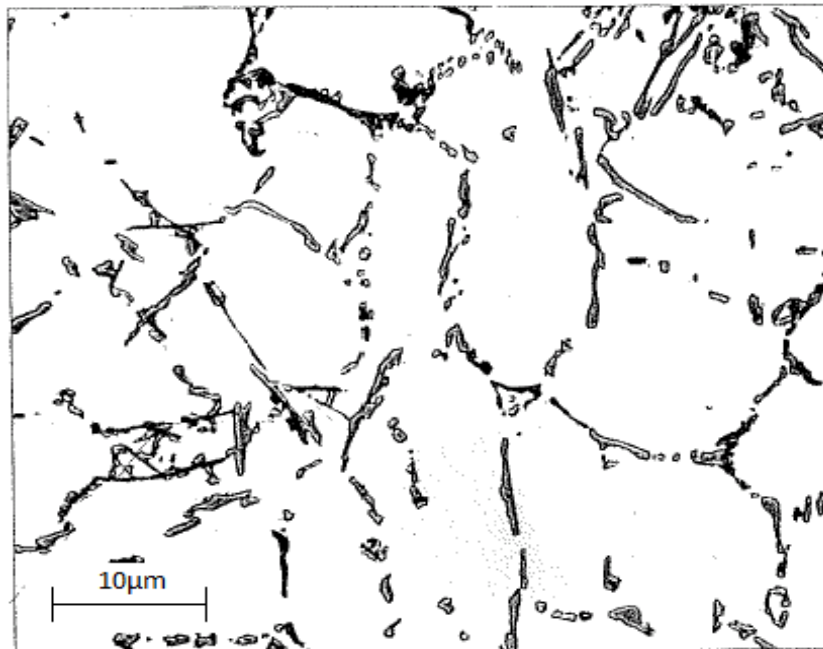


Figure III-4 : Microstructure de l'aluminium

2. Métallisation par l'acier inoxydable sur l'Al pur

2.1. La métallisation à la température ambiante

La durée de la métallisation est variable de 1 seconde à 5 secondes.

Les quatre métallographies des figures III-5,..., III-9, illustrent l'interface du substrat et du dépôt d'acier inoxydable, ainsi que l'épaisseur de la couche métallisée, et mettent en évidence l'augmentation de l'épaisseur de décollement en fonction du temps de maintien de la projection.

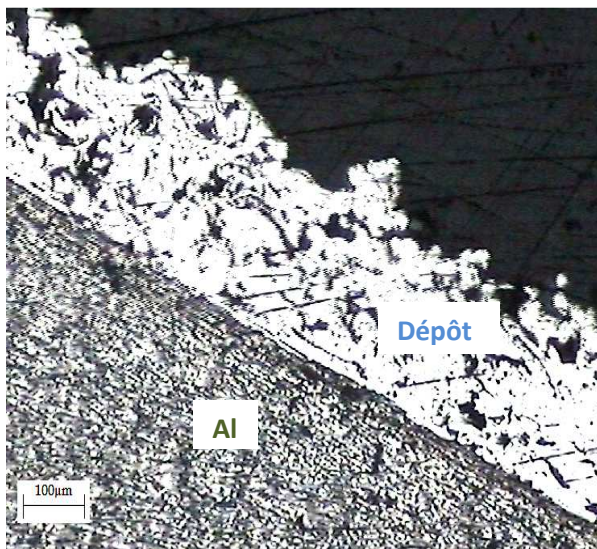


Figure III-5 : Al-acier à l'ambiante, 1 s

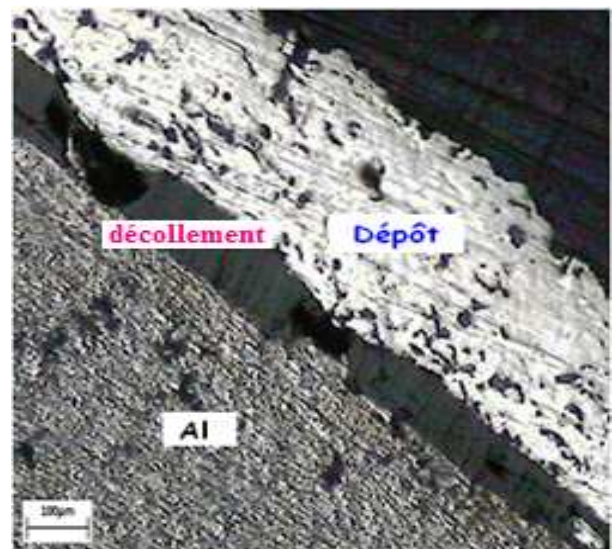


Figure III-6 : Al-acier à l'ambiante, 2 s

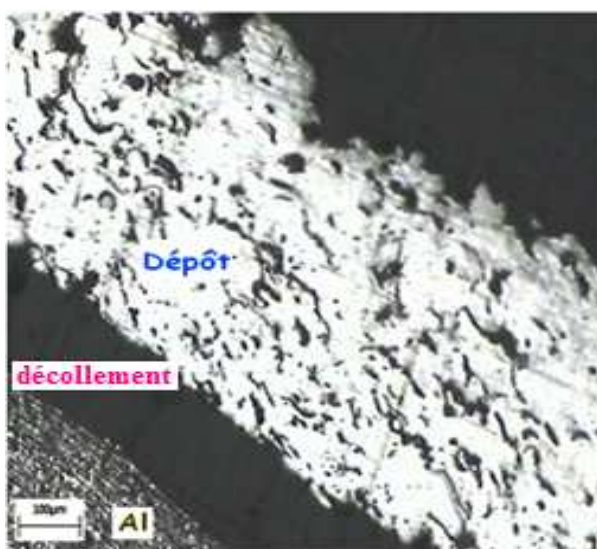


Figure III-7 : Al-acier à l'ambiante, 3 s

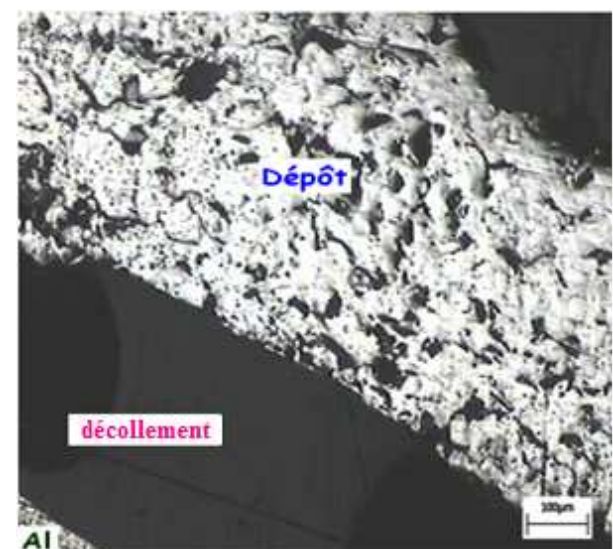


Figure III-8 : Al-acier à l'ambiante, 4 s

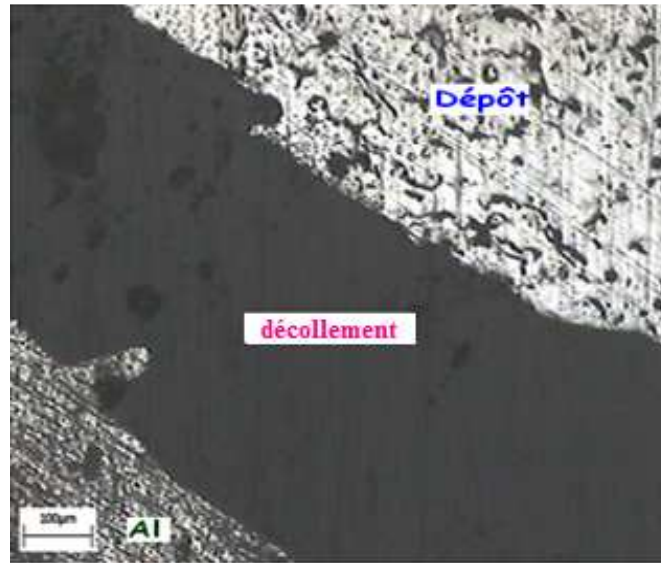


Figure III-9 : Al-acier à l'ambiante, 5 s

Les valeurs du *tableau III-1* et la *figure III-10* présentent une évolution par une croissance de l'épaisseur du décollement et de l'épaisseur du dépôt en fonction du temps de projection. Ceci confirme l'étude dans le cas de la projection thermique par la fusion d'un fil [27].

La *figure III-11* met en évidence l'évolution de l'é (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt (Ed). $E_i = f(E_d)$ présente une allure linéaire. Ainsi, plus l'épaisseur de dépôt augmente, plus on constate une décohésion entre le substrat et le dépôt.

Ceci peut s'expliquer par :

- Une énergie d'adhésion faible qui résulte de l'énergie de surface du substrat et de l'énergie de surface des constituants du dépôt.
- Les contraintes intrinsèques, aussi appelées les contraintes de croissance qui agissent fortement sur l'adhérence du dépôt provoquée par l'évolution de l'épaisseur du dépôt.
- Les contraintes thermiques générées essentiellement par la température du substrat qui est basse. Il existe une forte dilatation due au chauffage puis une contraction du substrat lors du refroidissement.
- Les contraintes structurales dues à la différence du réseau cristallin entre le dépôt cc et le substrat cfc.
- Les contraintes de trempe résultent du refroidissement rapide d'une lamelle à partir de la température de fusion jusqu'à la température ambiante du dépôt.

Tableau III-1 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection (de l'acier) à la température ambiante (Al-Acier).

Durée de Projection (sec)	1	2	3	4	5
Épaisseur de dépôt (µm)	224	371	490	530	790
Épaisseur de l'interface (µm)	15	140	152	192	350
Température après projection (°C)	80	133	180	193	213

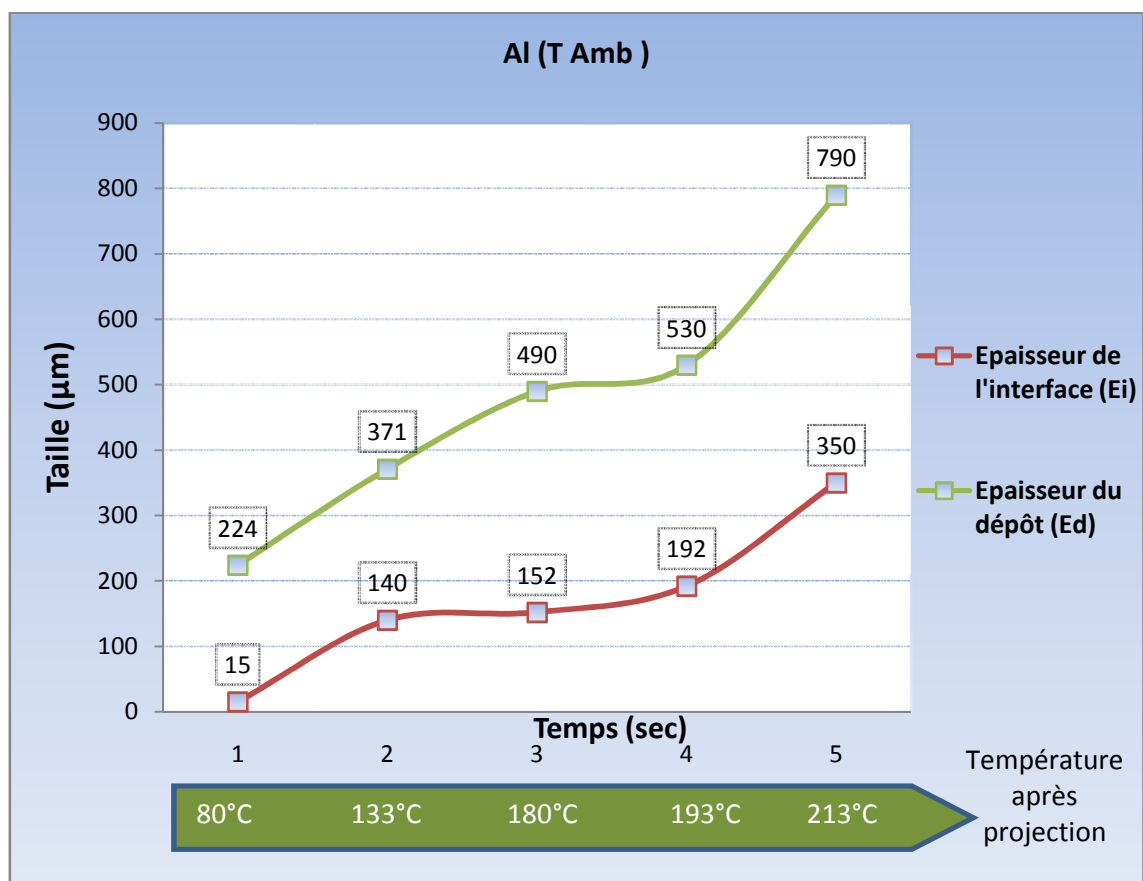


Figure III-10: Graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et du décollement (Ei) en fonction du temps de projection (Al-Acier).

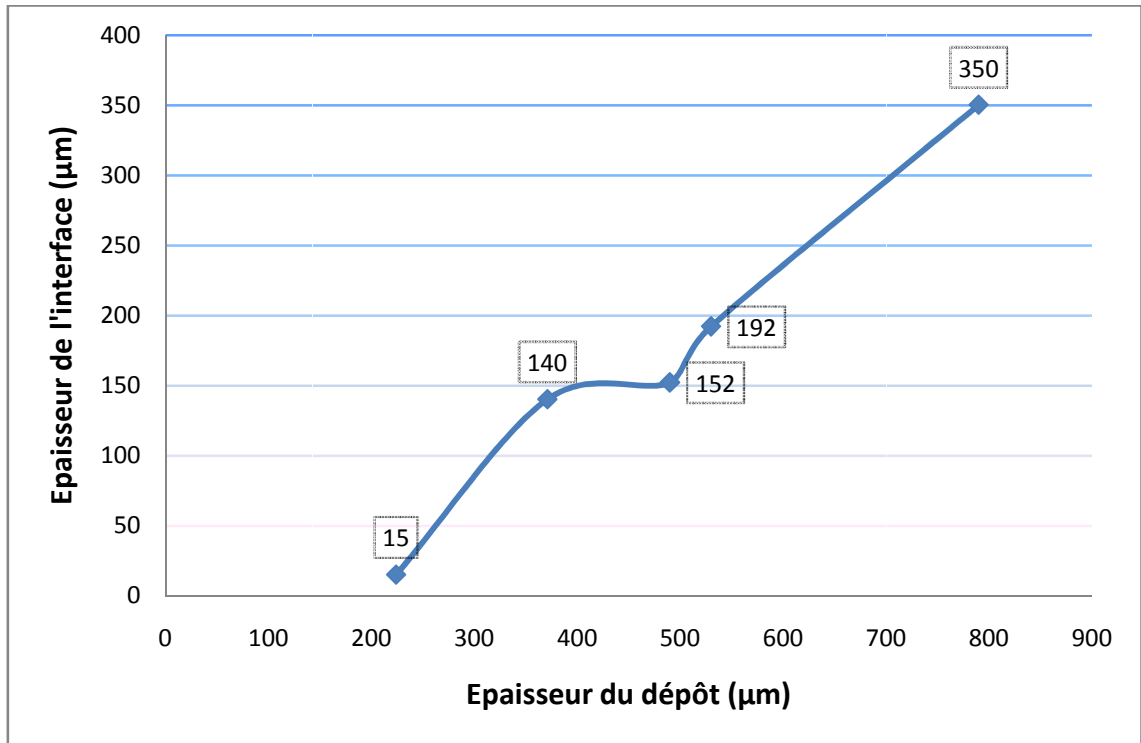


Figure III-11: Graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d) (Al-Acier).

2.2. La métallisation par préchauffage

Des préchauffages à différentes températures ont été effectués au chalumeau à 50°C, 70°C, 90°C et 110°C.

2.2.1. Préchauffage à 50°C

Le préchauffage à 50°C environ a été effectué au chalumeau, et on constate selon les métallographies des figures III-12, ..., III-15, que l'épaisseur du décollement est réduite par rapport à la température ambiante.

Le tableau III-2 et la figure III-16 confirment qualitativement de meilleurs résultats par rapport à la figure III-10.

Pour un dépôt de 415 µm, la meilleure adhérence est mise en évidence par la présence de l'interface figure III-13.

Cette bonne adhérence découle essentiellement de la diminution de l'effet des contraintes thermiques qui sont liées directement à la température du substrat.

Cependant, la figure III-15 montre qu'il y a un détachement entre le dépôt et le substrat pour un temps de projection supérieur à 3 secondes. Ce détachement est dû aux contraintes intrinsèques qui deviennent très importantes suite à l'augmentation de l'épaisseur du dépôt et à l'effet de dilatation du substrat lors du chauffage et à l'effet de la contraction lors du refroidissement.

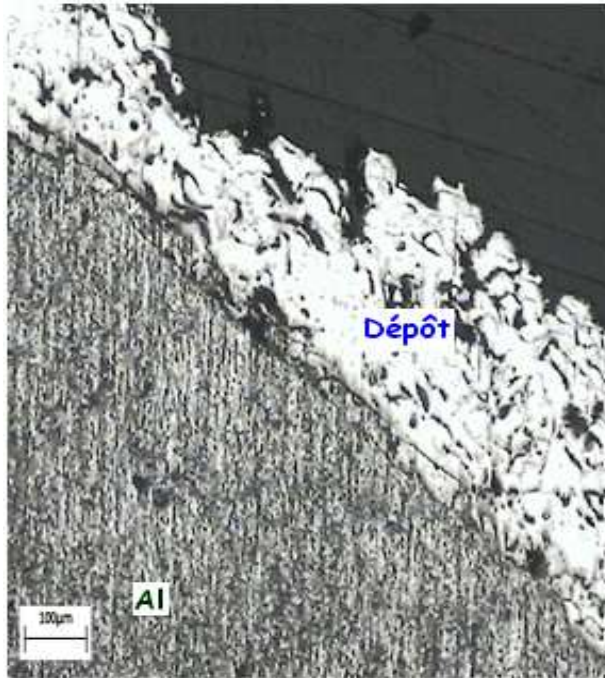


Figure III-12 : Al-acier à 50°C, 1 s

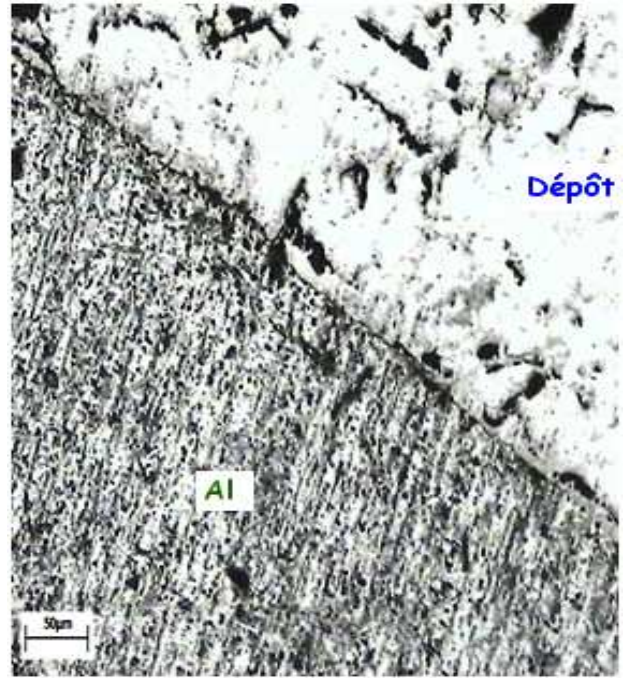


Figure III-13 : Al-acier à 50°C, 2 s

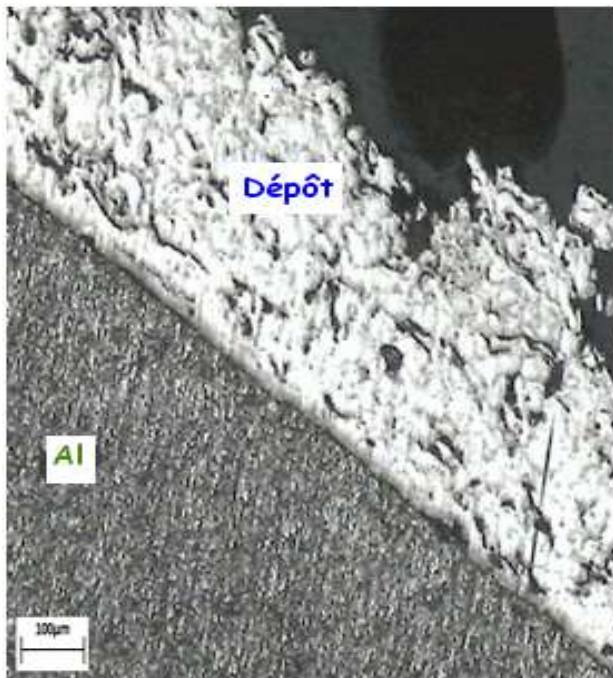


Figure III-14 : Al-acier à 50°C, 3 s

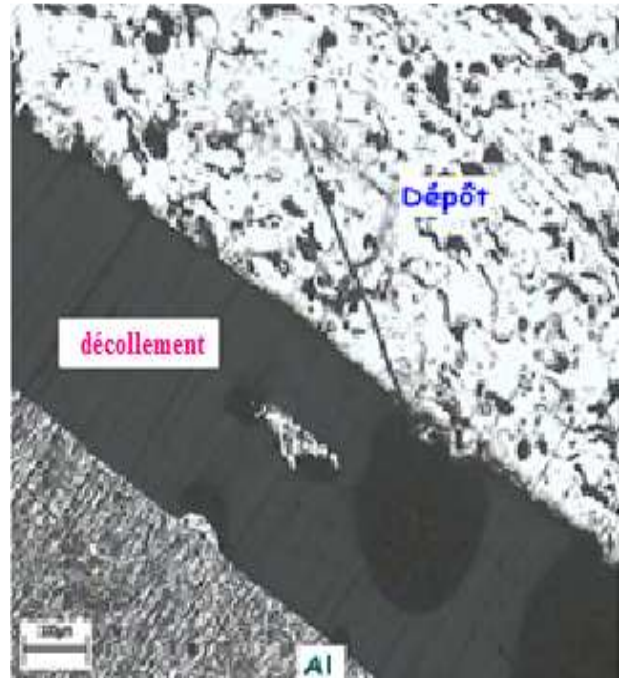


Figure III-15 : Al-acier à 50°C, 4 s

Tableau .III-2 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection par préchauffage de 50°C (Al-Acier).

Durée de Projection (sec)	1	2	3	4	5
Épaisseur de dépôt (µm)	238	415	563	670	847
Épaisseur de l'interface (µm)	0	0	30	320	290
Température après projection (°C)	96	144	196	215	250

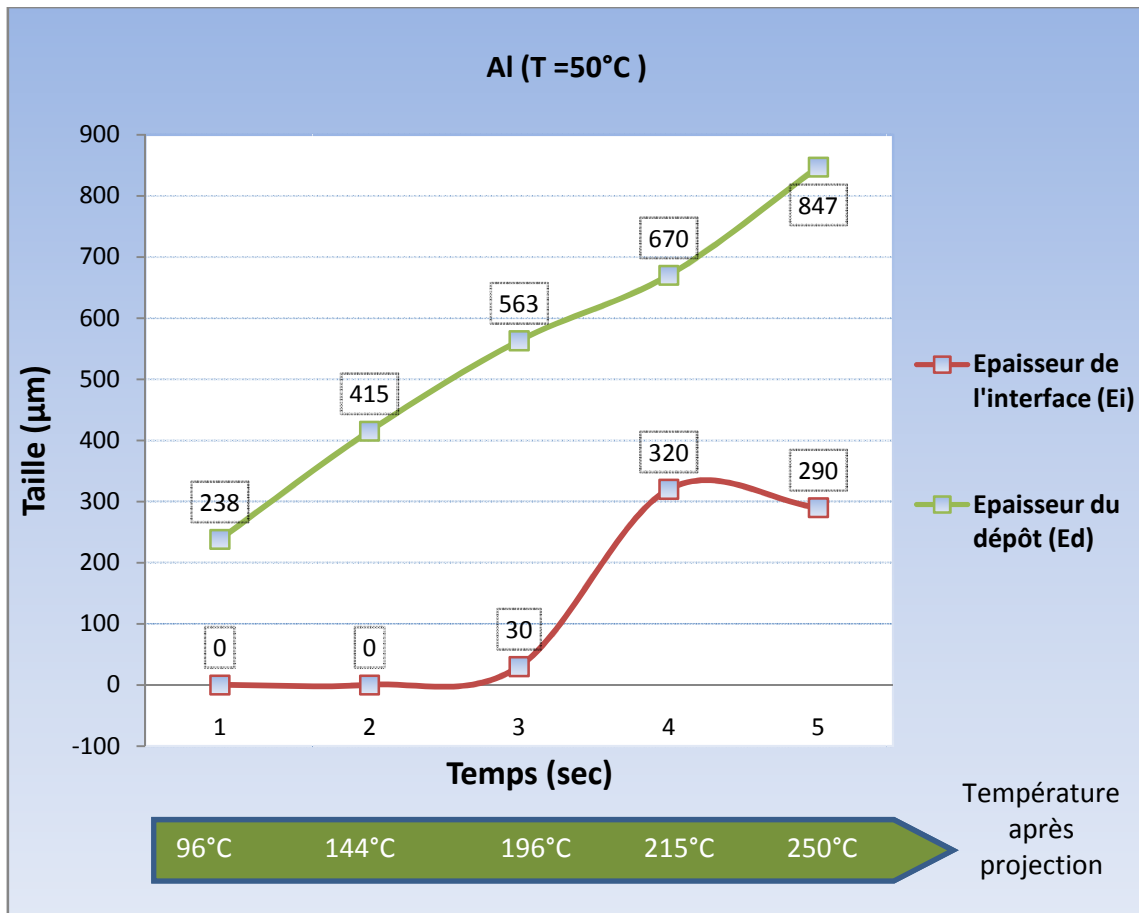


Figure III-16 : Graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 50°C (Al-Acier).

2.2.2. Préchauffage à 70°C

Par un préchauffage de 70°C, on constate que l'épaisseur du décollement est plus petite comparée aux deux cas précédents, (figures III-17,...., III-21).

Le tableau III-3 et la figure III-22 confirment qualitativement de meilleurs résultats par rapport à la figure III-16.

Ce bon état de l'interface dépend particulièrement de la diminution de l'effet du choc thermique liée directement à la température du substrat (70°C).

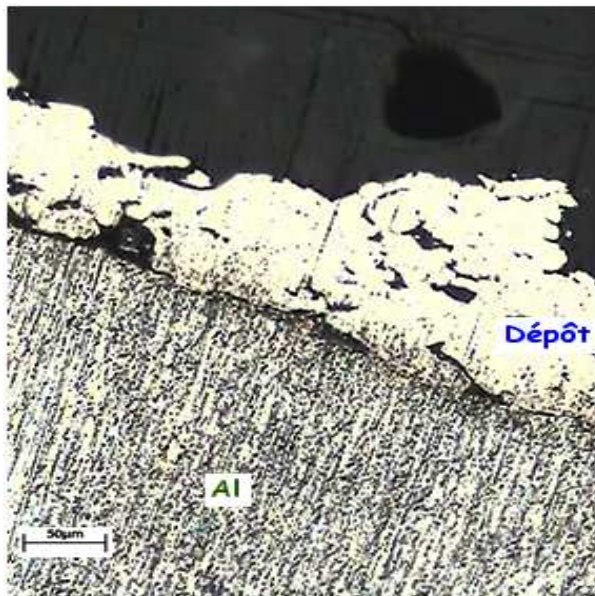


Figure III-17 : Al-acier à 70°C, 1 s

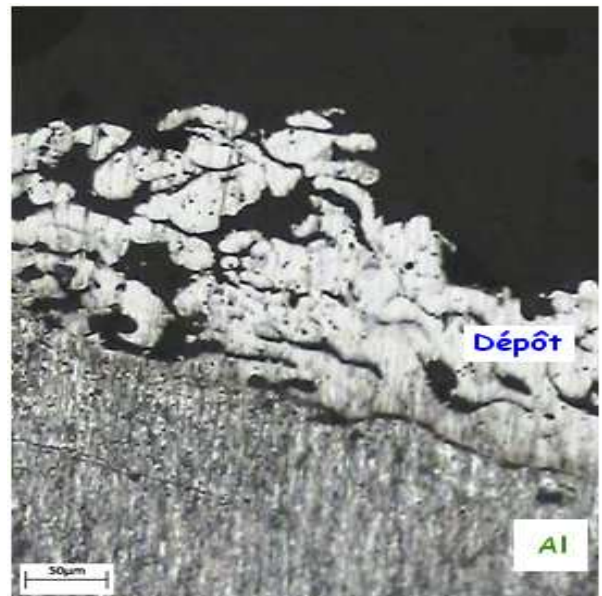


Figure III-18 : Al-acier à 70°C, 2 s

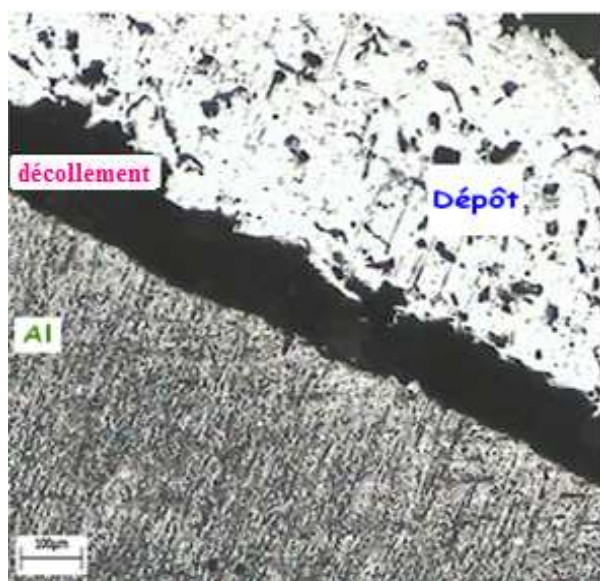


Figure III-19 : Al-acier à 70°C, 3 s

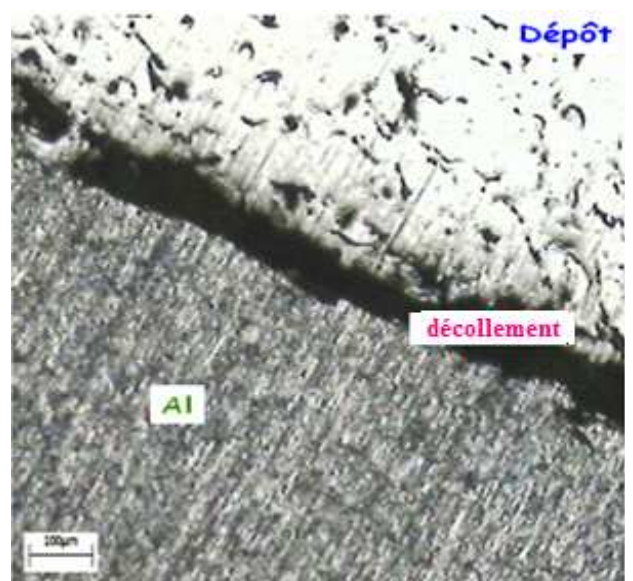


Figure III-20 : Al-acier à 70°C, 4 s

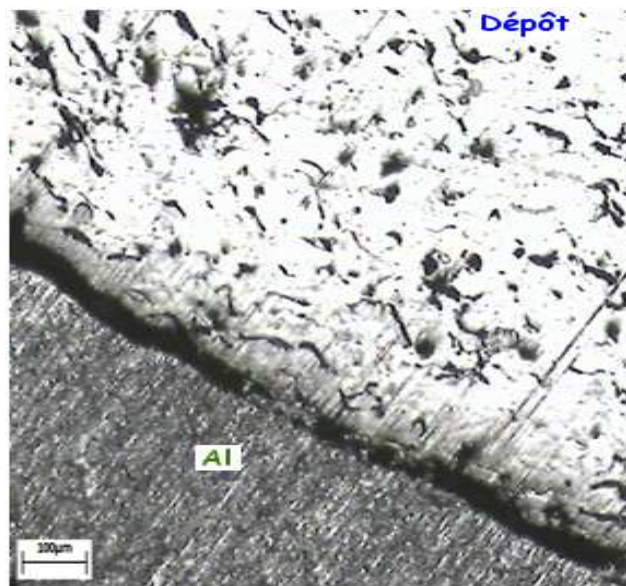


Figure III-21 : Al-acier à 70°C, 5 s

Tableau .III-3: Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection avec un préchauffage de 70°C (Al-Acier).

Durée de Projection (sec)	1	2	3	4	5
Épaisseur de dépôt (μm)	140	181	468	688	958
Épaisseur de l'interface (μm)	0	9	100	66	30
Température après projection (°C)	107	154	220	310	395

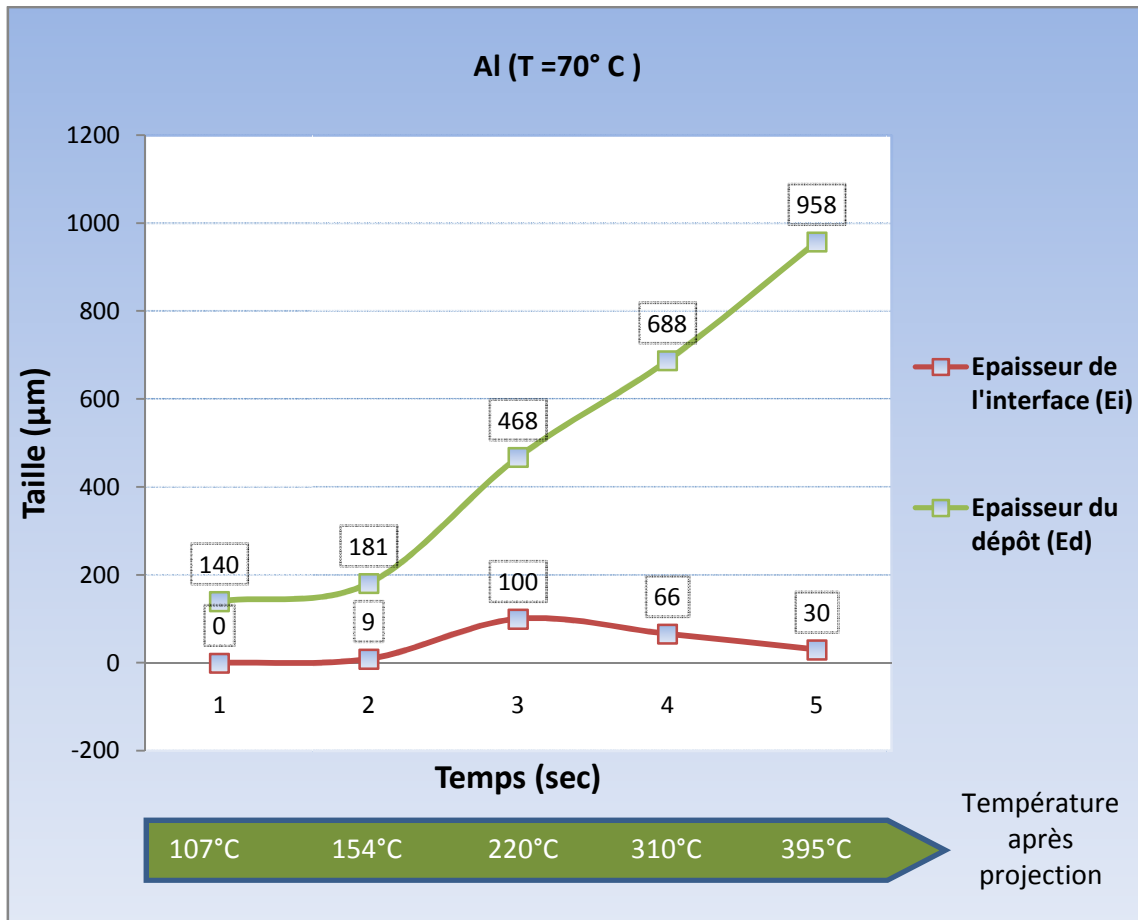


Figure III-22 : graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 70°C (Al-Acier).

2.2.3. Préchauffage à 90°C et à 110°C

Les résultats obtenus avec un préchauffage de 90°C et 110°C sont les meilleures. Il n'y a presque pas de décollement (bon état d'interface) pour toutes les durées de la projection (1s, 2s, 3s, 4s, 5s), voir les figures III-23, ..., III-31.

Les tableaux III-4, III-5 et les figures III-32, III-33 confirment qualitativement ces résultats.

Pour une épaisseur du dépôt de presque 1 mm et avec un préchauffage de 90°C l'adhérence est très bonne et il n'y a pratiquement pas de décollement. Cette épaisseur correspond à un rechargement et non à un simple traitement de surface de quelques micromètres µm (voir la figure III-27).

Cette bonne adhérence découle essentiellement de la diminution de l'effet des contraintes thermiques, elles-mêmes directement liées à la température de préchauffage du substrat, et aussi à la diminution de l'effet de dilatation du substrat lors du chauffage et à l'effet de contraction lors du refroidissement.

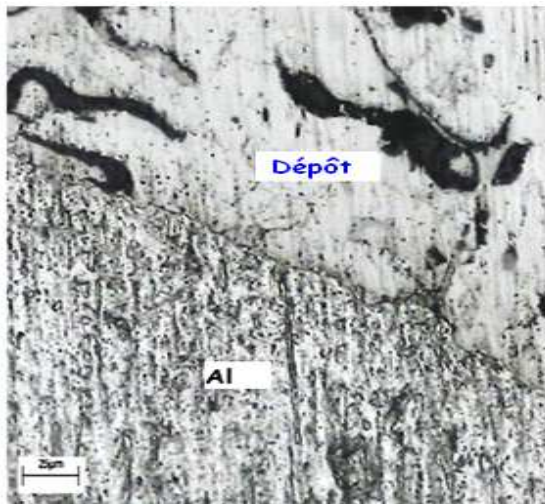


Figure III-23 : Al-acier à 90°C, 1 s

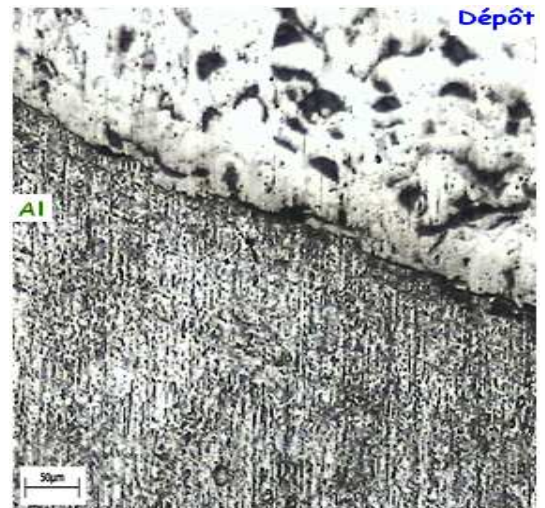


Figure III-24 : Al-acier à 90°C, 2 s

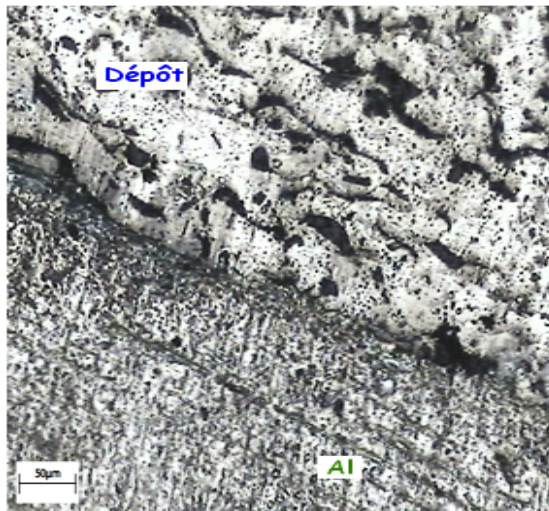


Figure III-25 : Al-acier à 90°C, 3 s

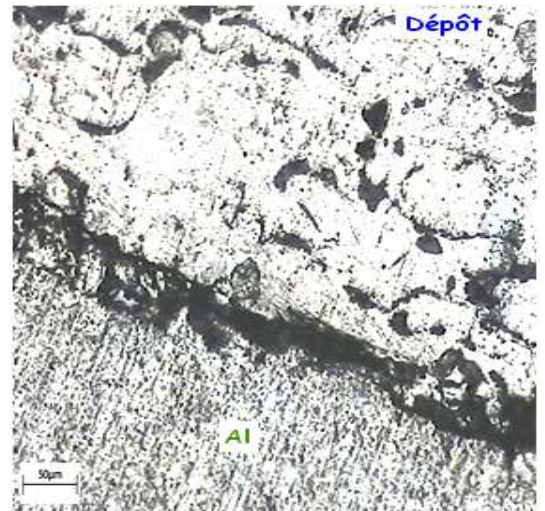


Figure III-26 : Al-acier à 90°C, 4 s

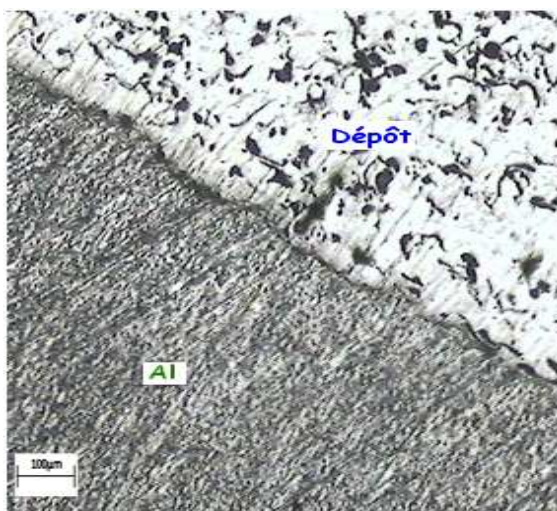


Figure III-27 : Al-acier à 90°C, 5 s

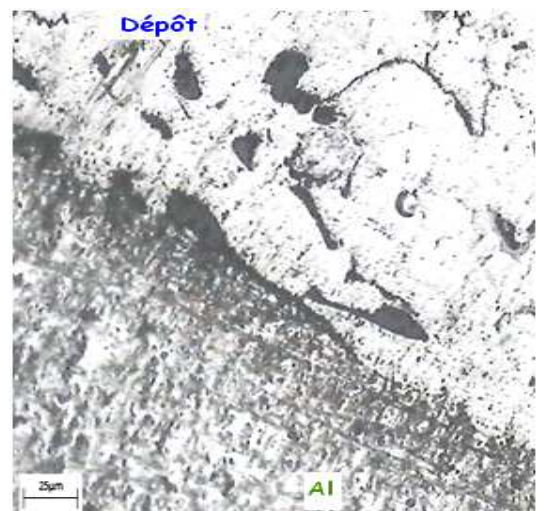


Figure III-28 : Al-acier à 110°C, 1 s



Figure III-29 : Al-acier à 110°C, 2 s

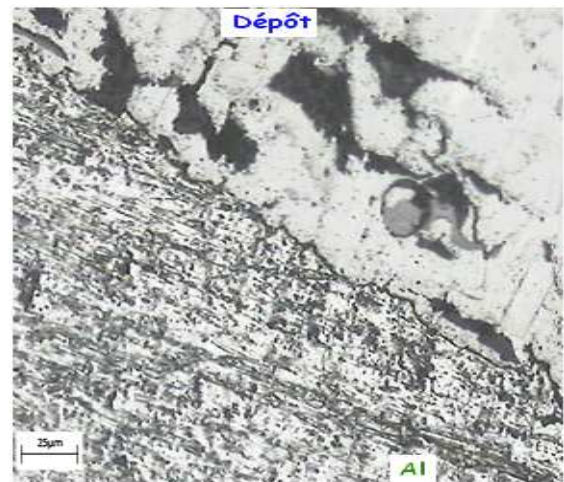


Figure III-30 : Al-acier à 110°C, 3 s



Figure III-31 : Al-acier à 110°C, 4 s

Tableau III-4 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection avec un préchauffage de 90°C (Al-Acier).

Durée de Projection (sec)	1	2	3	4	5
Épaisseur de dépôt (µm)	250	390	603	664	980
Épaisseur de l'interface (µm)	0	0	2	25	0
Température après projection (°C)	150	252	307	403	430

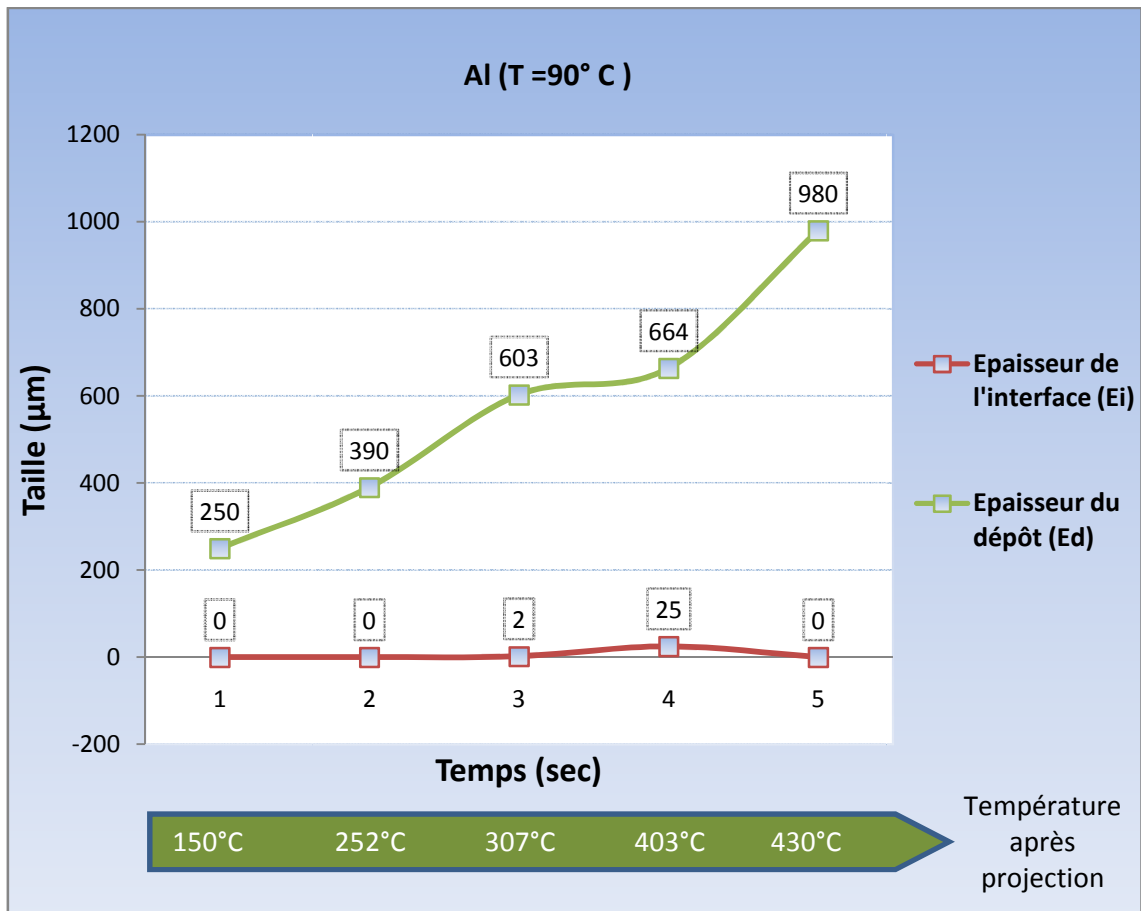


Figure III-32 : Le graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 90°C (Al-Acier)..

Tableau III-5 : Valeurs de l'épaisseur du dépôt et du décollement correspondant aux durées de projection avec un préchauffage de 110°C (Al-Acier).

Durée de Projection (sec)	1	2	3	4	5
Épaisseur de dépôt (µm)	219	471	525	740	990
Épaisseur de l'interface (µm)	0	0	0	33	200
Température après projection (°C)	240	300	350	420	495

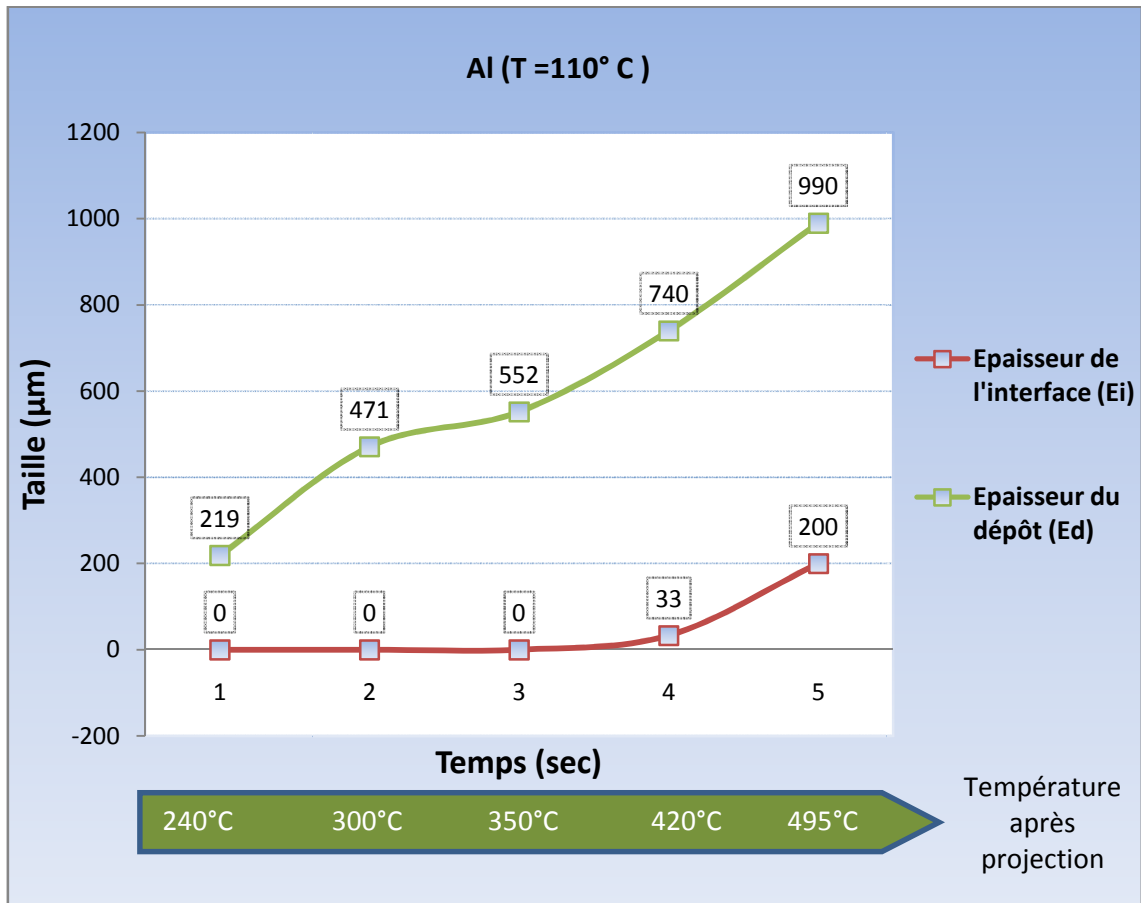


Figure III-33 : Le graphique représentant l'évolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction du temps de projection avec un préchauffage 110°C (Al-Acier).

✓ **Influence de la température de préchauffage sur l'évolution de l'interface**

L'augmentation de la température de préchauffage favorise une bonne adhérence du dépôt. Cette adhérence est due à la diminution du choc thermique entre le dépôt et le substrat.

Le graphique de la figure III-10 met en évidence l'existence d'un choc thermique dans le cas de la projection sur le substrat non préchauffé, ce qui provoque le décollement du dépôt à travers une interface croissante.

Par contre, après le préchauffage, on a obtenu des résultats meilleurs. Ceci est dû, au fait que les contraintes thermiques sont moins importantes, alors que pour des épaisseurs plus importantes, le dépôt se décolle et les contraintes intrinsèques agissent fortement sur l'adhérence de dépôt.

Les tableaux III-6,..., III-8 et les figures III-34,..., III-36 illustrent l'évolution de décollement en fonction des températures de préchauffage pour différents temps de projection.

Tableau III-6 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour 1 s de projection (Al-Acier).

Température de préchauffage (°C)	25	50	70	90	110
Épaisseur de dépôt (μm)	224	238	140	250	219
Épaisseur de l'interface (μm)	15	0	0	0	0

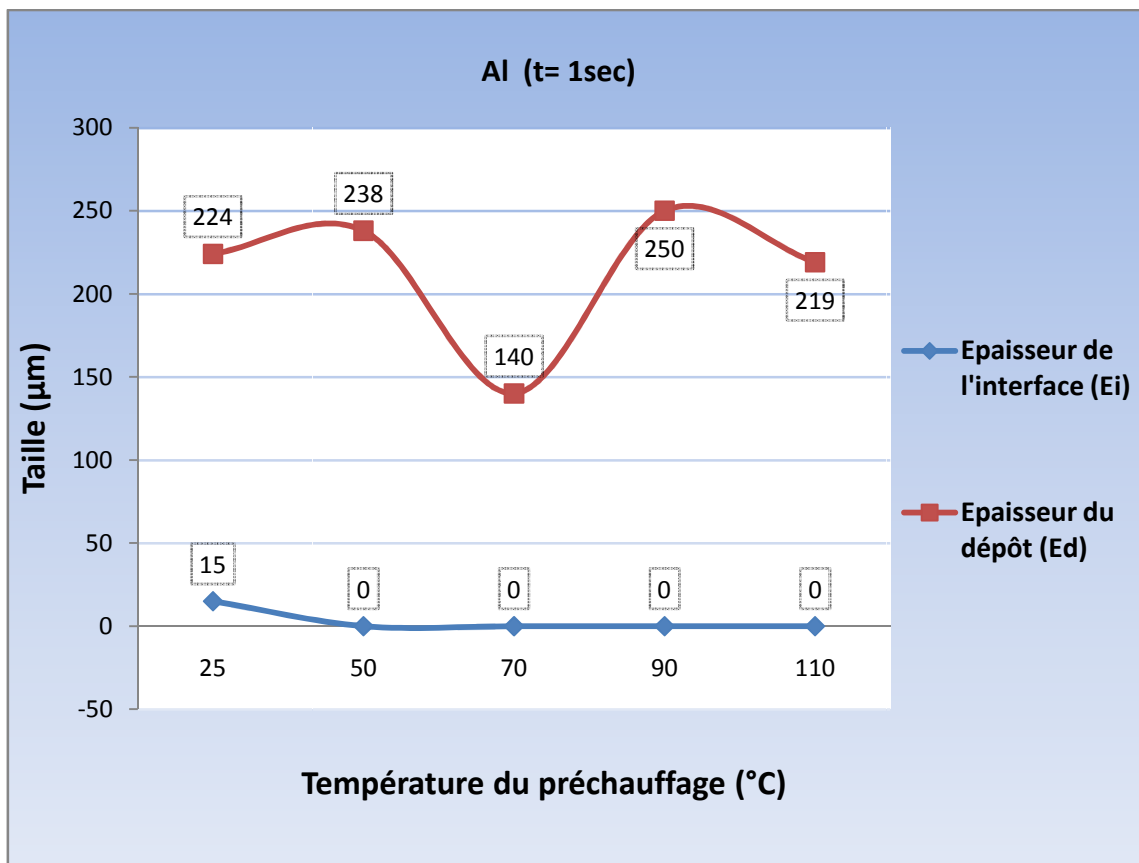


Figure III-34 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 1s (Al-Acier).

Tableau III-7 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour 2 s de projection (Al-Acier).

Température de préchauffage (°C)	25	50	70	90	110
Épaisseur de dépôt (μm)	371	415	181	390	471
Épaisseur de l'interface (μm)	140	0	9	0	0

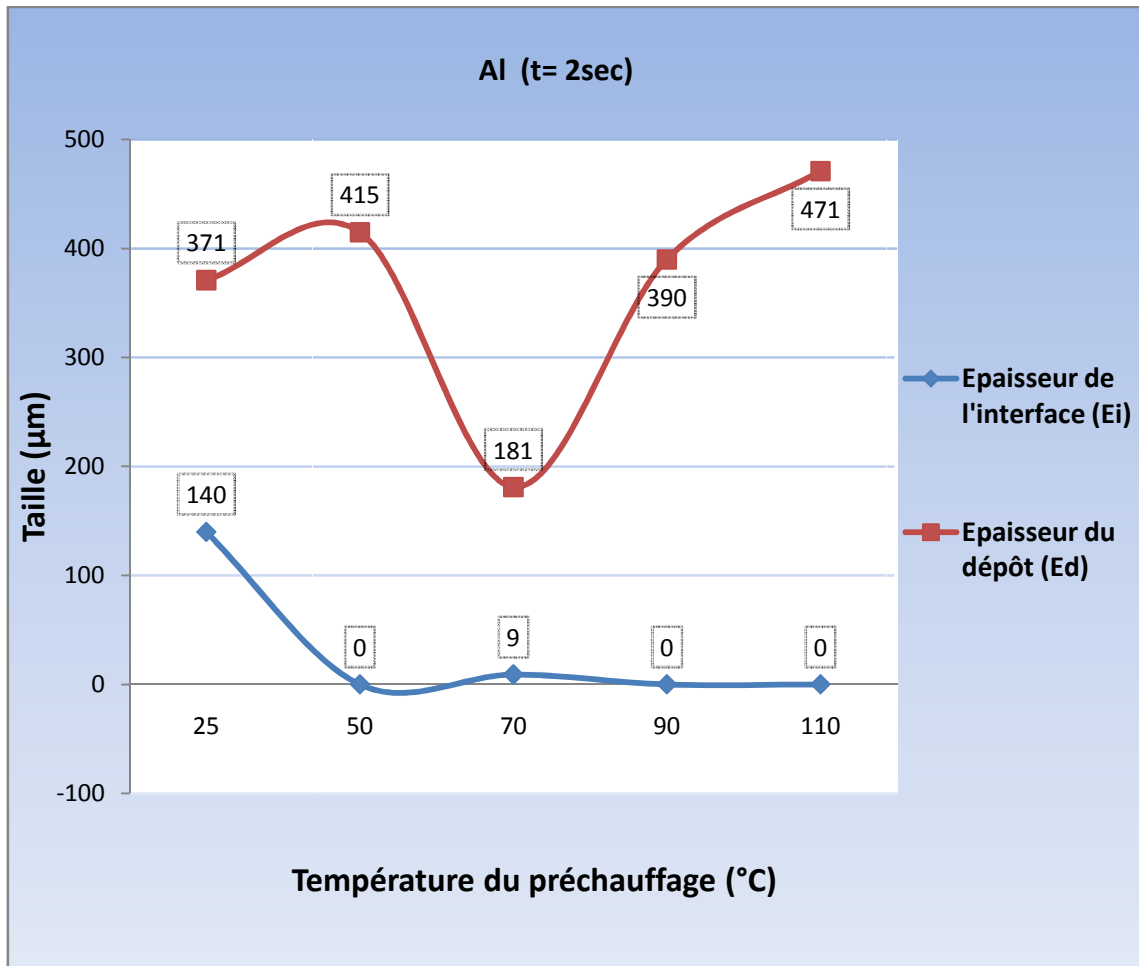


Figure III-35 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 2s (Al-Acier).

Tableau III-8 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour 5 s de projection (Al-Acier).

Température de préchauffage (°C)	25	50	70	90	110
Épaisseur de dépôt (μm)	790	847	958	980	990
Épaisseur de l'interface (μm)	350	290	30	0	200

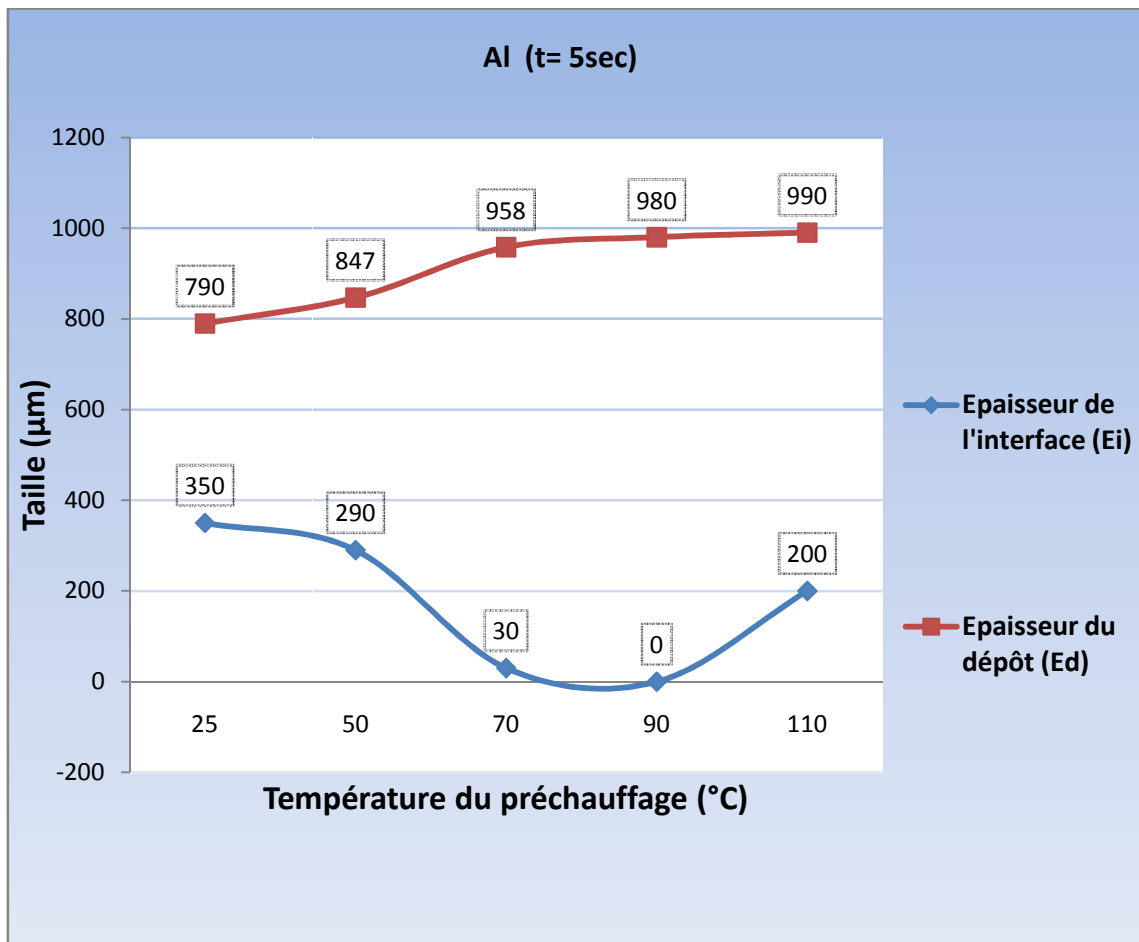


Figure III-36 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 5s (Al-Acier).

✓ Influence de la température après projection sur l'évolution de l'interface

Pour des températures après projection comprises entre 310 et 430°C l'adhérence est bonne entre le dépôt et le substrat, car dans cet intervalle de température l'aluminium est dans un état plastique, donc les particules de la poudre projetées vont s'incruster dans le métal (substrat) grâce à leurs température très élevées et à leurs vitesse de projection (cinétique de projection) sans provoquer une déformation au substrat, malgré l'effet de dilatation et de contraction.

Au delà de cet intervalle la température après projection est tellement élevée qu'elle provoque la déformation du substrat, ce qui explique le décollement du dépôt.

3. Métallisation par l'acier inoxydable sur l'AS 13

3.1. La métallisation à la température ambiante

De même que pour l'Al on applique des durées de métallisation variantes de 1 à 5 secondes.

On remarque dans ce cas qu'il n'y aucune adhérence entre le substrat et le dépôt, donc initialement aucune diffusion, en plus de l'effet de dilatation du substrat qui rejette le dépôt en question. Il y'a lieu de bien mettre en évidence l'effet du choc thermique entre le substrat et les particules chaudes de 2000°C environs.

3.2. La métallisation par préchauffage

Des préchauffages à différentes températures ont été effectués au chalumeau en appliquant le même principe et suivant les mêmes étapes pour l'Al.

3.2.1. Préchauffage à 50°, 70°, 90°, 110° C

Les préchauffages de 50°C, 70°C, 90°C, 110°C ont été effectués avec la flamme du pistolet, et on constate selon les métallographies des *figures III-37, ..., III-40* pour 1 seconde de projection que l'état de l'interface est très bon. Cela est illustré à travers le *tableau III-9* et la *figure III-41*.

t = 1s , T = 50°C, ..., 110°C

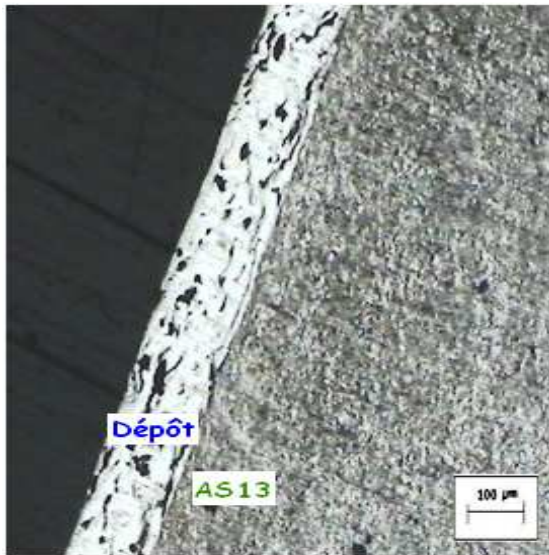


Figure III-37 : As13-acier à 50°C, 1s

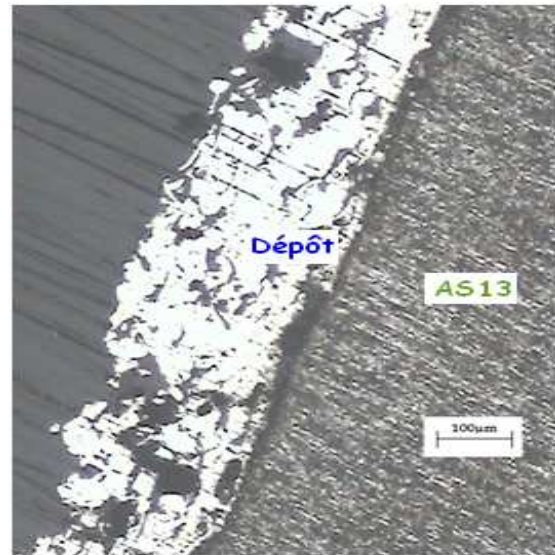


Figure III-38 : As13-acier à 70°C, 1s

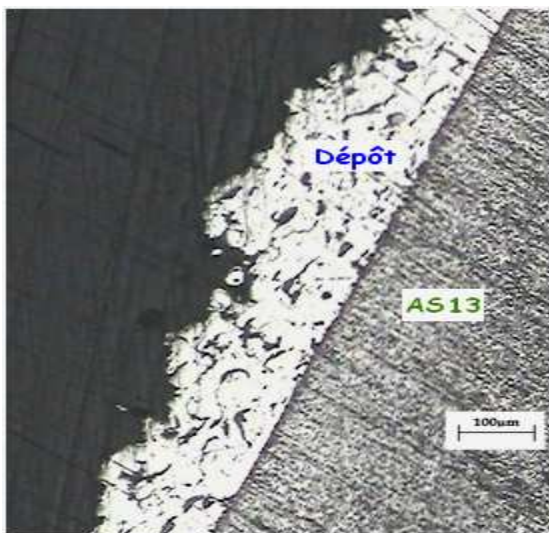


Figure III-39 : AS13-acier à 90°C, 1s

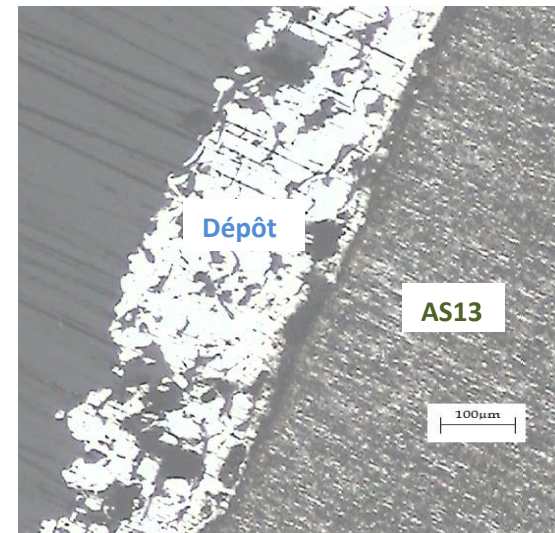


Figure III-40 : AS13-acier à 110°C, 1s

Tableau III-9 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour 1 s de projection (AS13-Acier).

Température de préchauffage (°C)	50	70	90	110
Épaisseur de dépôt (μm)	133	213	184	331
Épaisseur de l'interface (μm)	0	16	6	0

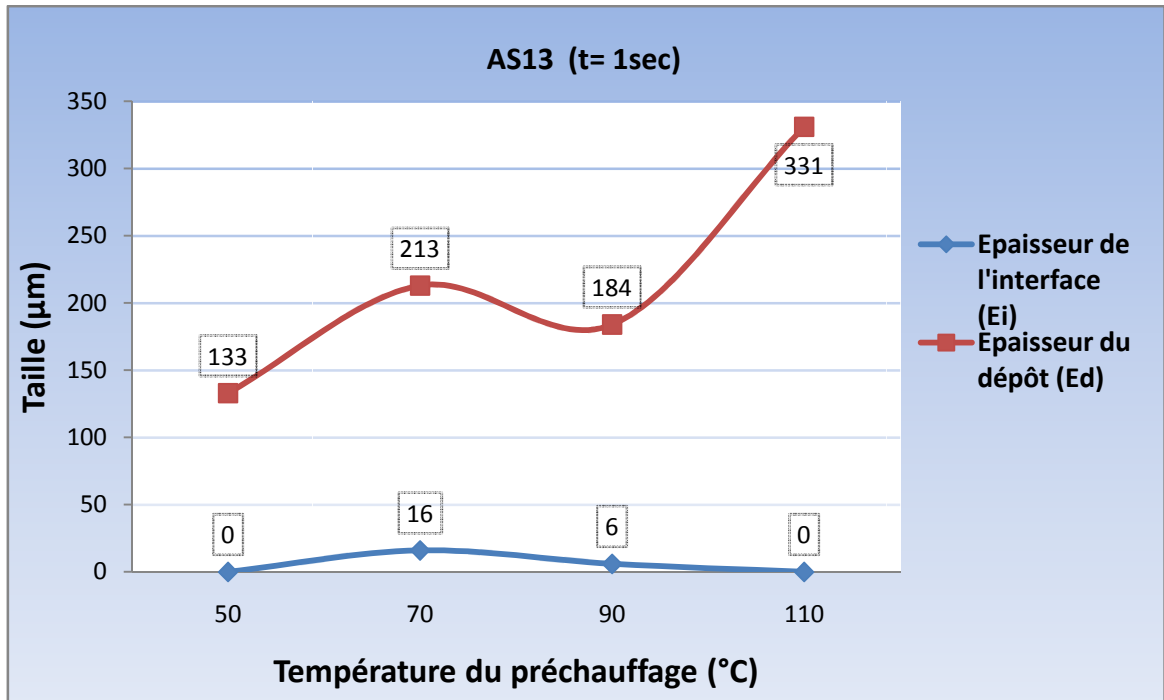


Figure III- 41 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 1s (AS13-Acier).

L'adhérence est meilleure que celle de la température ambiante pour la quelle on n'a pas du tout, cela est dû au choc thermique entre le substrat et le dépôt.

Les figures III-42, ..., III-45 montrent que plus la température de préchauffage augmente plus la l'épaisseur du décollement diminue. Cela est dû, en faite, à la diminution des contraintes thermiques entre le substrat et le dépôt à cause de l'augmentation de la température du préchauffage, cela est illustré dans le tableau III-10 et la figure III-46.

t = 3s , T = 50°C.... 110°C

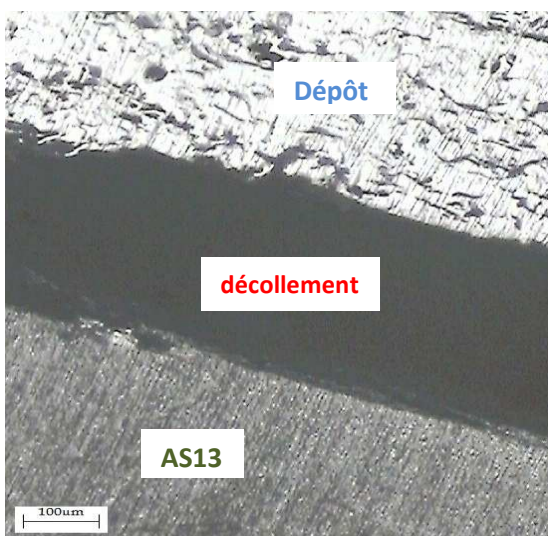


Figure III-42 : AS13-acier à 50°C, 3s

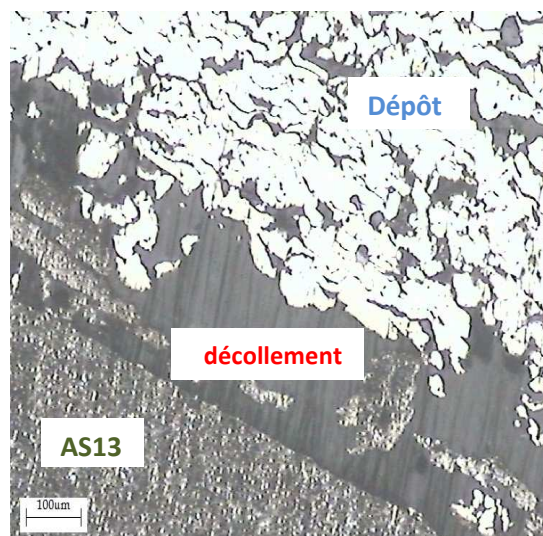


Figure III-43 : AS13-acier à 70°C, 3s

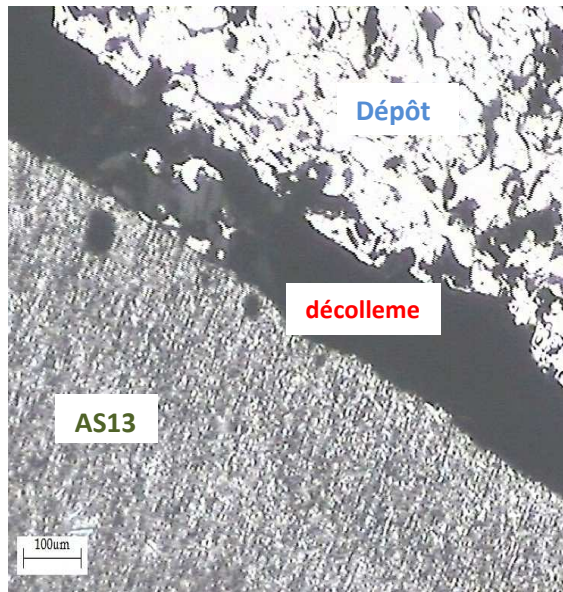


Figure III-44 : AS13-acier à 90°C, 3s

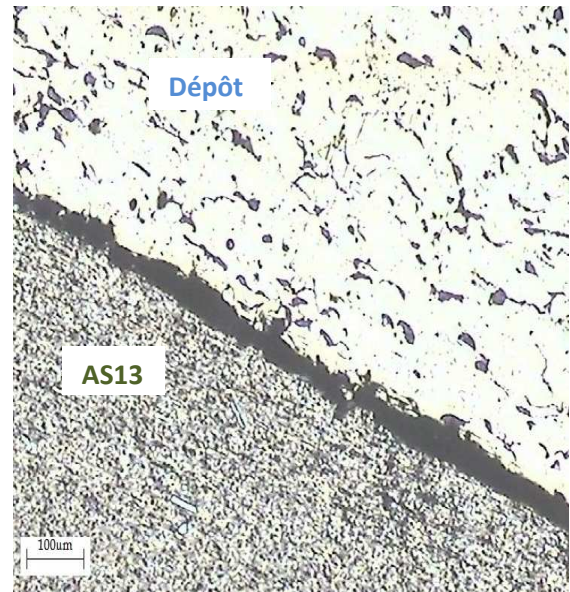


Figure III-45 : AS13-acier à 110°C, 3s

Tableau III-10 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 3s (AS13-Acier).

Température de préchauffage (°C)	50	70	90	110
Épaisseur de dépôt (μm)	530	552	530	648
Épaisseur de l'interface (μm)	318	245	151	92

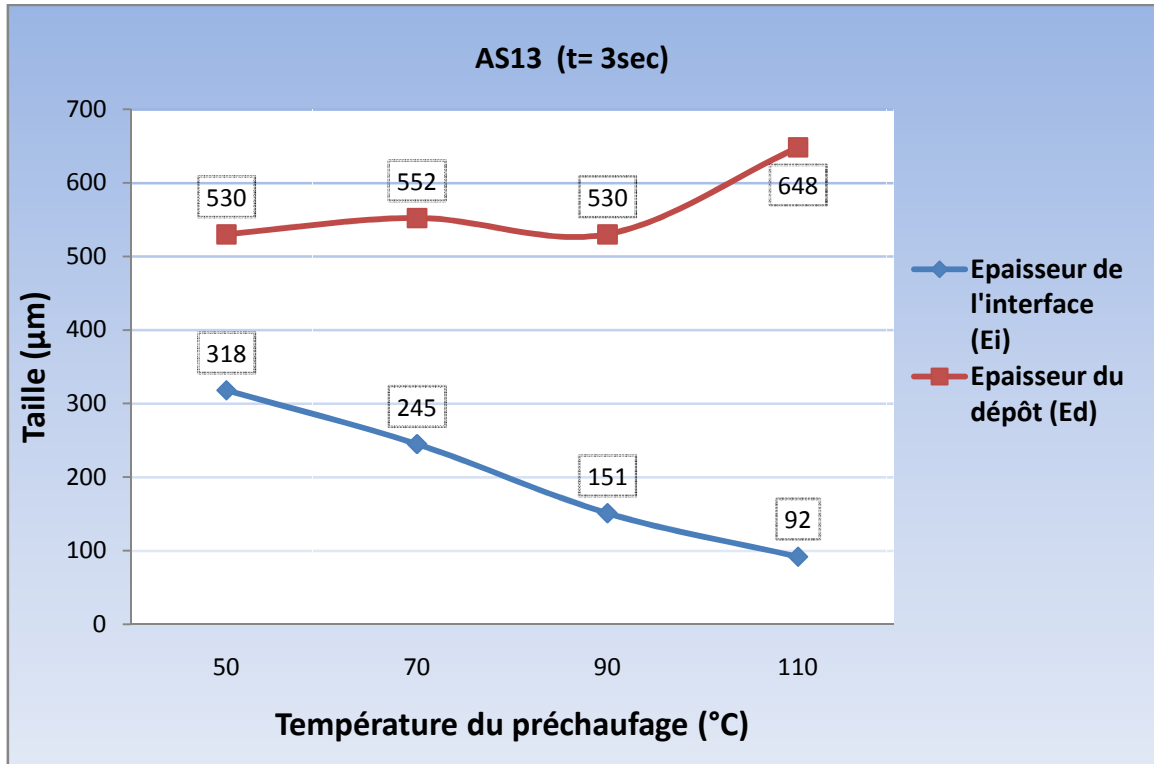


Figure III- 46: Evolution de l'épaisseur du dépôt (Ed) et l'épaisseur du décollement (Ei) en fonction de la température de préchauffage pour un temps de projection de 3s (AS13-Acier).

Les figures III-47,..., III-51 montrent que l'augmentation du temps de projection provoque le décollement du dépôt et cela est dû à l'augmentation des contraintes intrinsèques comme l'illustrent le tableau III-11 et la figure III-52.

t = 1,2, ... 5s , T = 110°C

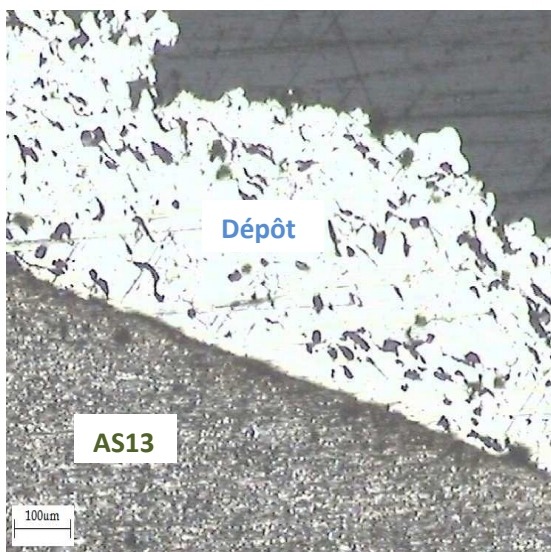


Figure III-47 : AS13-acier à 110°C, 1s

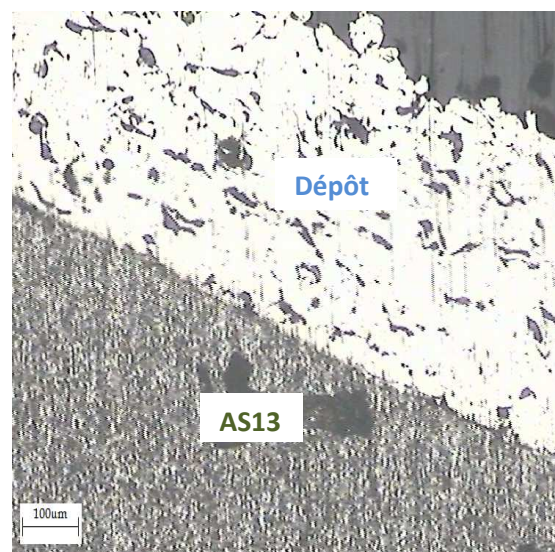


Figure III-48 : AS13-acier à 110°C, 2s

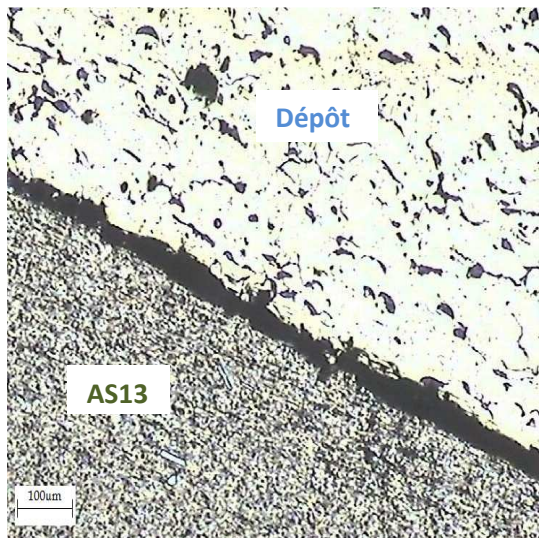


Figure III-49 : AS13-acier à 110°C, 3s

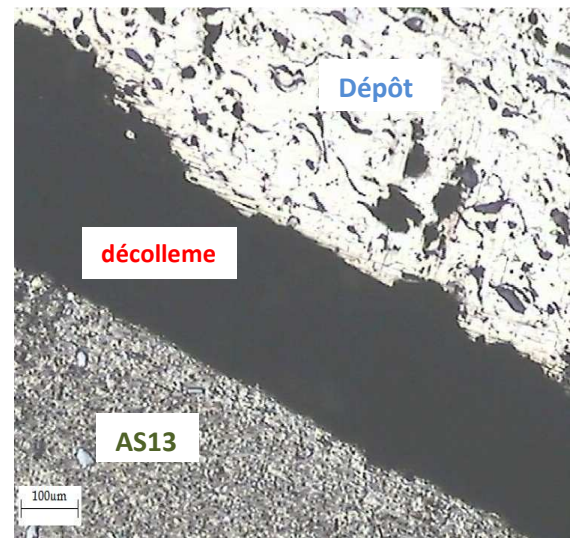


Figure III-50 : AS13-acier à 110°C, 4s

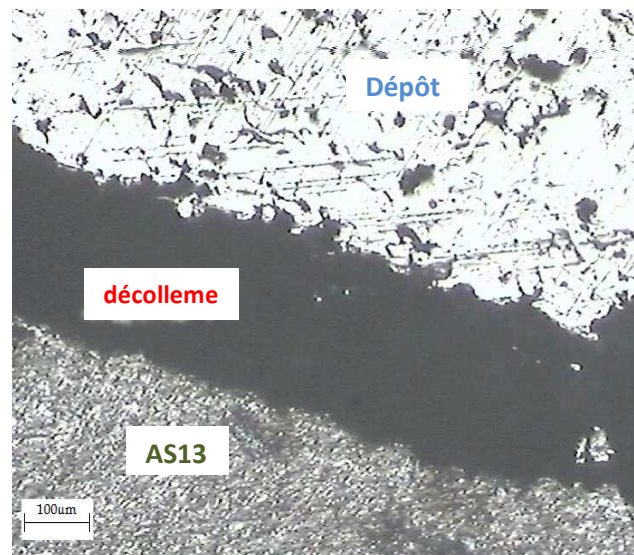


Figure III-51 : AS13-acier à 110°C, 5s

Tableau III-11 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 110°C (AS13-Acier).

Durée de Projection (sec)	1	2	3	4	5
Épaisseur de dépôt (μm)	331	393	648	749	940
Épaisseur de l'interface (μm)	0	0	92	203	231

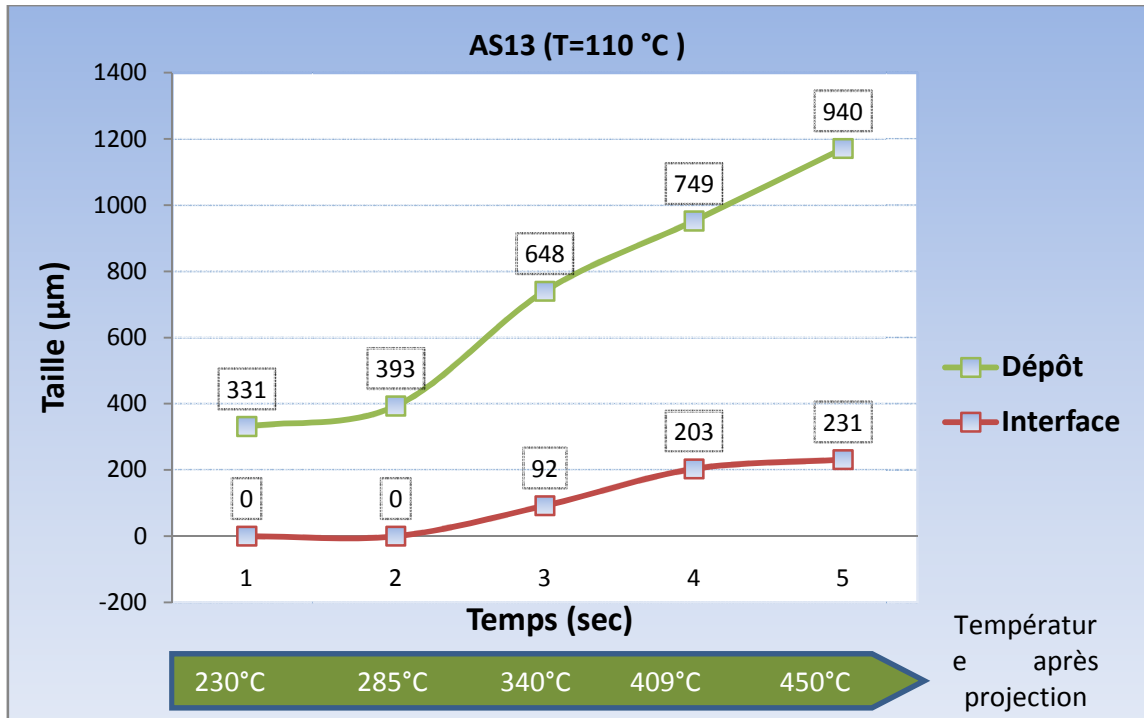


Figure III -52 : Evolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et l'épaisseur du décollement (E_i) en fonction du temps de projection avec un préchauffage de 110°C (AS13-Acier).

Conclusion

Les résultats de nos interprétations nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le temps optimal de projection pour toutes les températures de préchauffage est de 1 seconde pour les deux substrats à savoir l'aluminium et AS13.
- De plus, on constate en général que l'augmentation de la température de préchauffage favorise une bonne adhérence du dépôt.
- Un traitement de surface $\leq 0.2\text{mm}$ est possible pour toutes les températures de préchauffage comprises entre 50° et 110° (conditions optimales).
- Dans le cas de l'aluminium pur et pour la température de préchauffage de 90°C on a pu atteindre une épaisseur du dépôt de presque 1 mm sans avoir de problèmes de décollement avec une épaisseur de substrat de 5mm. Cette épaisseur du dépôt correspond à un rechargement et non à un simple traitement de surface.
- Il y'a bien lieu d'utiliser un substrat de plus grande épaisseur (1,5cm) pour réduire l'effet de la déformation.
- Il faut maîtriser les paramètres de la projection, le temps, la température de préchauffage, l'état de l'interface et l'épaisseur du substrat (15x20x40).

Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de déposer un dépôt d'acier inoxydable sur deux substrats ; l'aluminium pur et un alliage d'aluminium AS13 afin d'étudier l'évolution de l'interface en fonction des différents paramètres : le temps de projection, la température de préchauffage.

Au vu des résultats obtenus et de leurs interprétations, on peut conclure que :

- L'étude métallographique nous a permis de visualiser la structure des revêtements et de l'interface sur des coupes transversales. Nous avons remarqué que les dépôts réalisés sont stratifiés et pourvus de pores et d'oxydes comme classiquement attendu tel que la projection thermique à fils [27].
- L'adhérence des dépôts projetés à la température ambiante (sans préchauffage) est très faible. Cette constatation met en évidence l'importance du préchauffage des substrats (pour minimiser le choc thermique entre les particules fondues et le substrat) dans l'amélioration de l'adhérence.
- L'augmentation de la température de préchauffage favorise une bonne adhérence du dépôt.
- Les dépôts obtenus pendant une seconde de projection pour toutes les températures de préchauffage adhèrent très bien au substrat.
- Un traitement de surface $\leq 0.2\text{mm}$ est possible pour toutes les températures de préchauffage (conditions optimales).
- La mauvaise adhésion et due particulièrement à l'effet de dilatation du substrat lors du chauffage et à l'effet de la contraction lors du refroidissement. Pour réduire ce phénomène, il y a bien d'augmenter l'épaisseur du substrat et optimiser la durée du préchauffage.
- Les dépôts adhèrent mieux au substrat d'aluminium pur qu'à celui d'AS13, ceci est dû à la dureté de ce dernier (à cause de la solution de substitution qui durcie le métal) qui est plus élevée que celle de l'aluminium.

On peut dire que l'utilisateur, dans le cadre de l'exploitation de la projection thermique est confronté à plusieurs problèmes au niveau de l'interface et pour y remédier, il faut que certains points soient développés. Nous préconisons alors comme perspectives:

- ✚ D'utiliser un substrat de plus grande épaisseur (1,5cm) pour réduire l'effet de la déformation due à la dilatation et à la contraction. L'épaisseur servirait de bridage.

- ✚ Des traitements thermiques (post traitement) après la projection pour améliorer l'adhérence et permettre une diffusion entre le substrat et le dépôt.
- ✚ Des tests d'arrachements pour mieux caractériser l'adhérence.
- ✚ A définir l'épaisseur du dépôt maximal qu'on puisse réaliser sur l'alliage d'Al avec une bonne adhérence.

Bibliographies

- [1]. **J.R.Davis**, 'Aluminium and aluminium alloys' ASM Specialty handbook, ASM international Materials Park, OH, U.S.A, 1993.
- [2]. **Christian Vargel Dunod**. 'Corrosion de l'Aluminium', Paris, 1999
- [3]. International Aluminium institue (IAI) :
<http://www.worldaluminium.org/iai/stats/index.asp>
- [4]. **Christian BERGEL**, 'Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages'. technique de l'ingénieur M 4661, (année 2008)
- [5]. **Michel Colombie et Coll.** 'Matériaux industriels : Matériaux métallurgiques'. (Collection Dunod – Paris septembre 2000, N°= 1058). ISBN210004575X
- [6]. **Sylvain JACOB**. 'Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie'. Technique de l'ingénieur (Société ARGEGA), 2005.
- [7]. **Roger DEVELAY**. 'Aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriété métalliques'. Techniques de l'ingénieur M438 année 2008.
- [8]. **VERGEL**. 'Le comportement de l'aluminium et ses alliages'. édition DUNOD, Paris 1979.
- [9]. **Revue métallurgie**. 'Calcification des alliages d'aluminium'. 49-spécial soudage-avril 2003
- [10]. **Sebastien MORIN**. 'Effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression'. a380, université du Quebec à Chicoutimi, Juillet 2002 thèse d'ingénieur
- [11]. **J.Barralis**. 'Précis de métallurgie', 5^{ème} édition, Afnor, Nathan 1990
- [12]. **O.Madelaine-Dupuich and J.Stolarz**. 'Fatigue of eutectic Al-Si Alloys'. Materials Science Forum, 1996 Vol 217-222
- [13]. **B.Budbost, P.Sainfout**. 'Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium', techniques de l'ingénieur, M240.
- [14]. **R.OLTRA and O.HEINTZ**. 'Thermal oxidation induced during laser cleaning of aluminium-magnesium alloys', applied physics A: Material science and processing volume 1. Number6/ november 2005.
- [15]. **A.CORNET, P.DEVILLE**. 'Physique et ingénierie des surfaces'. Edition EDP Science 1998.
- [16]. **N.MESRATI, Q.SAIF, D.TREHEUX**. 'Projection plasma de zircon sur différents substrats métallique'. II^{ème} conférence Franco-Allemande sur les céramiques. Technique, 4-6 mars 1987, A chen/ Aix, la chapelle (RFA).

- [17]. **N.MESRATI, D.NGUYEN, D.TREHEUX**. 'Rôle du zinc et de l'argent sur l'adhérence du zircon projeté sur un alliage d'aluminium-silicium 12%'. Revue de métallurgie-CIT/science et génie de matériaux N°12 Décembre 1993, pp.1679-1680.
- [18]. **A.PRONER**. 'Revêtement par projection thermique' (technique de l'ingénieur, M1645) 2005.
- [19]. **A.PRONER**. 'Métallisation par impact', technique de l'ingénieur, M1640, année 2008.
- [20]. Etude à l'aide du choc laser, des mécaniques d'adhérence aux interfaces cuivre/aluminium et cuivre/cuivre obtenues par projection thermique (thèse de Sophie BARRADAS à l'école de mines de Paris, spécialité « science et génie des matériaux ». 2004
- [21]. <http://www.tcpp.fr/images/schemaprojection.gif>
- [22]. Guide d'emploi de la projection thermique, CETIM 1989
- [23]. **Benelouezzane abderrahman**. 'Etude du comportement en micro-percussion d'un revêtement en acier inoxydable élaboré par projection thermique'. Mémoire de PFE. ENP (2005).
- [24]. **Boumaali Walid**. 'Modélisation numérique de la distribution de température dans un matériau lors d'un processus de projection thermique'. Mémoire de PFE. ENP (2008).
- [25]. **Vech POWLOUISKI**. 'Dépôt physique, microstructures et propriétés'. Première édition. Presses polytechnique et universitaire romande. Lausanne 2003
- [26]. **Hasnaoui Iyes**. 'Etude métallographique de coupe transversales de dépôts obtenus par métallisation sur fonte grise'. Mémoire de PFE. ENP (2008).
- [27]. **ANCER Mourad**. ' Étude de la projection thermique d'un acier inoxydable et du molybdène sur un substrat d'alliage d'aluminium'. Mémoire de PFE. ENP (2009).
- [28]. **Abidal**, Lloyd's Register quality assurance
- [29]. **Nabi Brahim**. "Influence du dégazage à l'état liquide et solide sur des alliages d'aluminium". Mémoire de PFE. ENP (2009).
- [30]. <http://www.disrimesure.com/mesure-physiques>