

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieure et de la recherche scientifique



École nationale supérieure polytechnique

Département de génie métallurgie

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Métallurgie

Thème :

***Étude de la projection thermique d'un acier
inoxydable et du molybdène sur un substrat
d'alliage d'aluminium***

Proposé et dirigé par :

Pr. E.SALHI

Réalisé par :

ANCER Mourad

Juin 2009

ملخص:

في هذه الدراسة قمنا بتلييس الحديد الصلب الغير قابل للاكسدة الموليبدان على خليطين معدنيين (AG35 et AS13) و الهدف الاساسي من هذا العمل هو دراسة ظاهرة الالتحام بين معدن الاساس و طبقة التلييس عن طريق الشعلة الحرارية (القوس الكهربائي) وذلك قصد تحسين مقاومتها ضد التاكل و الاتلاف.

النتائج المتحصل عليها تسمح لنا بتحديد السمك بين طبقة التلييس و الخليط المعدني بدلالة وقت التلييس و سمك طبقة التلييس

الكلمات المفتاحية: الشعلة الحرارية ، الموليبدان ، الحديد الصلب غير القابل للتاكسد (AG35 et AS13)، الالتحام .

Résumé :

Dans le cadre de cette étude, nous avons projeté des dépôts d'un acier inoxydable et de molybdène sur deux alliages d'aluminium AS13 et AG35 par projection thermique à l'arc électrique afin d'augmenter leur résistance à la corrosion et à l'usure.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'adhérence entre le dépôt et le substrat par métallisation.

Les résultats nous ont permis d'optimiser la valeur de l'interface en fonction de la durée de la projection et de l'épaisseur de dépôt.

Mots clés : projection thermique, AS13, AG35, acier inoxydable, molybdène, adhérence.

Abstract:

In the setting of this study, we tempted to elaborate some layers of stainless steel and molybdenum on two aluminium alloys AS13 and AG35 by the thermal projection with the electric arc in order to increase their resistance to the corrosion and to the wear.

The main objective of this work is to study the adhesion between substrate and layer by thermal projection.

The results allowed us to optimize the value of thickness of the interface depending on the length of the projection and the thickness of the layer.

Keywords: thermal projection, stainless steel, AS13, AG35, molybdenum, adhesion

Remerciements

Je tiens à remercier vivement Mr E.SALHI mon promoteur pour son aide précieuse, ses conseils, ses orientations, sa patience et ses sacrifices pour le bon accomplissement de ce travail.

Je remercie mes enseignants qui m'ont donné cette formation de métallurgiste durant les trois années passées ensemble.

*Je remercie également tous les membres de jury :
Pr M.LARIBI, Pr N.MESRATI, Pr M.BOUABDALLAH, d'avoir
accepté de siéger dans mon jury.*

Je tiens à remercier également tous les responsables et personnels de l'entreprise « Algérie Métallisation », pour leur immense dévouement et leur contribution à l'avancée de ce travail.

Finalement, mes remerciements vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude.



DEDICACES

Je dédie ce travail :

- ❖ *A mon père et ma mère.*
- ❖ *A mes frères et mes sœurs*
- ❖ *A toute ma famille*
- ❖ *A tous mes amis*



Sommaires

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	4

I : Étude bibliographique

Introduction	5
I.1 : l'aluminium et ses alliages	6
I.1.1 : Principales propriétés de l'aluminium	6
I.1.1.1 : Propriétés physiques.....	6
I.1.1.2 : Propriétés mécaniques.....	6
I.1.1.3 : propriétés chimiques.....	7
I.1.1.4 : le recyclage de l'aluminium	7
I.1.2 : les alliages d'aluminium	7
I.1.2.1 : Principaux éléments d'alliages de l'aluminium.....	7
I.1.2.2 : Les traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	8
I.1.2.3 : Les alliages de fonderie.....	9
I.2 : La projection thermique	14
I.2.1 : Principe de la projection thermique	15
I.2.2 : Les différentes caractéristiques des revêtements	16
I.2.2.1 : Formation et structure d'un revêtement.....	16
I.2.2.2 : Adhérence.....	17
I.2.2.3 : Densité.....	21
I.2.2.4 : Dureté.....	21
I.2.3 : Les procédés	21
I.2.3.1 : Projection à la Flamme.....	21
I.2.3.2 : Projection à l'arc électrique.....	26
I.3 : Les aciers inoxydables	29
I.3.1 : Structure métallurgique et rôles des éléments d'addition	29
I.3.1.1 : Les éléments d'addition.....	29
I.3.1.2 : Système fer- chrome.....	31
I.3.1.1 : Système fer- chrome- nickel	31
I.3.1.1 : Éléments α - gènes et γ - gène.....	32
I.3.2 : Types d'aciers inoxydables	34
I.3.2:Les aciers martensitiques.....	34
I.3.2: Les aciers ferritiques.....	34
I.3.2: Les aciers austénitiques.....	34
I.3.2: Les aciers improprement dénommés "austéno-ferritiques".....	35
I.4 : Le molybdène	36
I.4.1 : Principale caractéristique de molybdène	36
I.4.1.1 : Caractéristique physique	36
I.4.1.2 : Les caractéristiques mécaniques	37
I.4.2 : Les applications du molybdène	37

II : Techniques expérimentales

II.1 : Matériaux utilisés.....	38
II.1.1 : Substrat.....	38
II.1.1.1 : Le moulage des pièces	38
II.1.1.2 : Composition chimique.....	39
II.1.1.3 La préparation des surfaces pour la projection.....	39
II.1.2 : Le dépôt projeté	41
II.1.2 : Conditions de projection thermique.....	41
II.1.2 : Métallographie.....	42
II.1.3.1 : Polissage.....	42
II.1.3.2 : Analyse micrographique.....	43

III: Résultats et interprétations

III.1 : État métallographique des alliages d'aluminium.....	44
III.2: Métallisation par l'acier inoxydable sur l'AS13 à la température ambiante.....	47
III.3 : Métallisation par l'acier inoxydable sur l'AS13 par préchauffage.....	50
III-4 : Métallisation par le molybdène sur l'AS13 à la température ambiante.....	53
III-5 : Métallisation par le molybdène sur l'AS13 par préchauffage.....	56
III.6: Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 à la température ambiante.....	59
III.7: Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 par préchauffage.....	62
III-8 : Métallisation par le molybdène sur l'alliage AG35 à la température ambiante.....	65
III-9 : Métallisation par le molybdène sur l'alliage AG35 par préchauffage.....	68

Conclusion.....	73
------------------------	-----------

Annexe.....	74
Bibliographie.....	77

Listes des figures

Fig. I-1 : le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium.....	9
Fig. I-2 : Portion riche en aluminium du diagramme d'équilibre binaire Al-Mg.....	12
Fig. I-3 : diagramme d'équilibre de l'alliage Al-Si.....	13
Fig. I-4 : Place de la projection thermique dans les traitements de surface.....	15
Fig. I-5 : Principe fondamental de la projection thermique.....	16
Fig. I-6 : Coupe d'un dépôt projeté thermiquement.....	16
Fig. I-7 : structure fragmentée.....	17
fig. 1-8 : structure en forme de disque.....	17
Fig. I-9 : Principe de fonctionnement du pistolet poudre flamme.....	22
Fig. 1-10 Projection de fil à la flamme.....	23
Fig. 1-11 : Principe de fonctionnement d'un pistolet HVOF.....	24
Fig. 1-12 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation.....	25
Fig. I-13 : Principe de fonctionnement d'un Torche a arc électrique.....	26
Fig. I-14 : principe de fonctionnement d'une torche plasma.....	28
Fig. I-15 : diagramme de phase Fe-Cr.....	30
Fig. I-16 : évolution du domaine γ avec la teneur en Ni.....	32
Fig. I-17 : diagramme de PYRCE et ANDREW	33
Fig. I-18 : Diagramme de Schaeffler.....	34
Fig. II-18 : Pistolet de projection à arc électrique « Arc spray 234 ».....	42
Fig. III.1 : AS13 non modifié	45
Fig. III.2 : AS13 non modifié.....	45
Fig. III.3: AS13 inoculé au Na.....	45
Fig. III.4: AS 13 inoculé au Na.....	45
Fig. III.5 : AG20 non modifié.....	46
Fig. III.6 : AG 20 non modifié	46
Fig. III.7: AG 20 inoculé au Na.....	46
Fig. III.8: AG20 inoculé au Na.....	46
Fig.III.9: AS13 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 6 sec.....	48
Fig. III.10: AS13 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 10 sec	48
Fig.III.11: AS13 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 12 sec	48
Fig.III.12: AS13 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 14 sec	48
Fig.III.13 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et de l'interface (Ei) en fonction du temps.....	49
Fig. III.14 : graphe représente l'évolution d'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt (Ed).....	49
Fig. III-15: AS13 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 4 sec	51
Fig. III-15: AS13 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 8 sec	51
Fig. III-17: AS13 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 12 sec	51

Fig. III-18: AS13 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 14 sec.....	51
Fig. III-19 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et de l'interface (Ei) en fonction du temps	52
Fig. III-20 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt(Ed).....	52
Fig. III-21: Graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (Ei), en fonction de l'épaisseur de dépôt(Ed) à l'ambiante et avec préchauffage	53
Fig. III-22: AS13 projeté par le molybdène à la température ambiante 2 sec	54
Fig. III-23: AS13 projeté par le molybdène à la température ambiante 6 sec	54
Fig. III-24: AS13 projeté par le molybdène à la température ambiante 12 sec.....	54
Fig. III-25: AS13 projeté par le molybdène à la température ambiante 14 sec	54
Fig. III-26 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et de l'interface (Ei) en fonction du temps	55
Fig. III-27 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) en fonction de l'épaisseur de l'interface (Ei).....	55
Fig. III-28: AS13 projeté par le molybdène par préchauffage 4 sec	56
Fig. III-29: AS13 projeté par le molybdène par préchauffage 8 sec.....	56
Fig. III-30: AS13 projeté par le molybdène par préchauffage 12 sec	56
Fig. III-31: AS13 projeté par le molybdène par préchauffage 14 sec.....	56
Fig. III-32 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et d'interface (Ei) en fonction du temps	57
Fig. III-33 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) en fonction de l'épaisseur de l'interface (Ei).....	58
Fig. III-34 : Graphe représente l'évolution de l'épaisseur (Ei) de l'interface en fonction de l'épaisseur de dépôt(Ed) a l'ambiante et avec préchauffage.....	58
Fig. III-35:AG35 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 4 sec	60
Fig. III-36: AG35 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 8 sec	60
Fig. III-37: AG35 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 10 sec	60
Fig. III-38: AG35 projeté par l'acier inoxydable à la température ambiante 14 sec	60
Fig. III-39 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et de l'interface(Ei) en fonction du temps.....	61
Fig. III-40 : graphe représente l'évolution d'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt(Ed).....	61
Fig. III-41: AG35 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 4 sec.....	63
Fig. III-42: AG35 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 8 sec	63
Fig. III-43: AG35 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 12 sec	63
Fig. III-44: AG35 projeté par l'acier inoxydable par préchauffage 14 sec	63
Fig. III-45 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et de l'interface (Ei) en fonction du temps.....	64

Fig. III-46 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt.....	64
Fig. III-47 : Graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt (Ed) à l'ambiante et avec préchauffage.....	65
Fig. III-48: AG35 projeté par le molybdène à la température ambiante 3 sec	66
Fig. III-49: AG35 projeté par le molybdène à la température ambiante 4.5 sec.....	66
Fig. III-50: AG35 projeté par le molybdène à la température ambiante 7.5 sec	66
Fig. III-51: AG35 projeté par le molybdène à la température ambiante 10.5 sec.....	66
Fig. III-52 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et de l'interface (Ei) en fonction du temps.....	67
Fig. III-53 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction d'épaisseur de depot (Ed)	67
Fig. III-54: AG35 projeté par le molybdène par préchauffage 2 sec	69
Fig. III-55: AG35 projeté par le molybdène par préchauffage 6 sec	69
Fig. III-56: AG35 projeté par le molybdène par préchauffage 10 sec	69
Fig. III-57: AG35 projeté par le molybdène par préchauffage 14 sec	69
Fig. III-58 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (Ed) et d'interface(Ei) en fonction du temps.....	70
III-59 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (Ei) en fonction de l'épaisseur de dépôt	70
Fig. III-60 : Graphe représente l'évolution de l'épaisseur d'interface (Ei) en fonction d'épaisseur de dépôt(Ed) à l'ambiante et avec préchauffage.....	71

Liste des tableaux

Tableau .I-1 : Effet des éléments d’alliages de l’aluminium.....	7
Tableau .I-2 : Les symboles des principaux constituants des alliages d’aluminium.....	10
Tableau. I-3 : propriétés thermique de molybdène.....	36
Tableau-II-1 : composition chimique de l’alliage Al-Si 13%_.....	39
Tableau-II-1 : composition chimique de l’alliage Al-Mg 20%.....	39
Tableau II.3 : Composition chimique des fils en acier inoxydable 55E.....	41
Tableau II.4 : les paramètres de projection.....	41
Tableau .III-1 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt de l’acier inoxydable projeté sur l’AS13 à la température ambiante et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	48
Tableau .III-2 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt de l’acier inoxydable projeté sur l’AS13 par préchauffage et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	51
Tableau .III-3 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt projeté par le molybdène sur l’AS13 à la température ambiante et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	54
Tableau .III-4 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt projeté par le molybdène sur l’AS13 par préchauffage et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	57
Tableau .III-5 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt projeté par l’acier inoxydable sur l’AG35 à la température ambiante et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	60
Tableau .III-6 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt projeté par l’acier inoxydable sur AG35 par préchauffage et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	63
Tableau .III-7 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt projeté par le molybdène sur AG35 à la température ambiante et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	66
Tableau .III-8 : les valeurs de l’épaisseur du dépôt projeté par le molybdène sur AG35 par préchauffage et de l’interface correspondant aux durées de projection.....	69
Tableau III-9 : récapitulatif des valeurs des durées de projection optimisées relatif à l’épaisseur d’interface zéro correspondant au dépôt métallisé.....	72

Chapitre I :
Étude bibliographique

Introduction

Les matériaux utilisés en industrie sont confrontés à plusieurs phénomènes tels que la fatigue, la corrosion, le frottement et l'usure, ces derniers peuvent apparaître à la surface ou se propager à l'intérieur de la pièce.

Pour éviter ces dégradations, on a fait recours au traitement de surface tel que la projection thermique qui a pour but de recharger les matériaux endommagés ou la mise en évidence des couches protectrices.

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. Ces revêtements sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels : 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,... Ils permettent 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 (chimique, électrique, magnétique).

Dans le présent mémoire, on s'intéresse à l'étude de la projection thermique par arc électrique d'un acier inoxydable et de molybdène sur deux substrats d'alliage d'aluminium AS13 et AG35.

Pour cela, la présentation est scindée en trois chapitres :

- 1) Une recherche bibliographique ayant conduit à trois 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 en particulier les alliages d'aluminium-silicium et les alliages d'aluminium-magnésium.
 - La deuxième partie présente une brève étude bibliographique sur les différentes techniques de projection thermique qui permettent de décrire le procédé arc-fil.
 - La troisième partie est consacrée à l'étude des différents types d'aciers inoxydables et de molybdène ainsi que leurs caractéristiques.
- 2) Une étude expérimentale concernant l'élaboration des substrats et des dépôts ainsi que leurs caractérisations microstructurales.
- 3) Le dernier chapitre est réservé à la présentation des différents résultats obtenus, suivi par des discussions et des interprétations.

Ce travail sera finalement clôturé par une conclusion générale.

I. 1 : Aluminium et ses alliages

L'élément aluminium a été découvert par le savant allemand Wöhler, à l'Université de Göttingen en 1827. En tonnage, la production d'aluminium représente 2 % environ de celle des aciers.

Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position après l'acier lorsque l'on parle de l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable.

I.1.1 : Principales propriétés de l'aluminium

I.1.1.1 : Propriétés physiques

L'aluminium est un élément du groupe III de la classification de MENDELEEV. Il cristallise dans une structure cubique à faces centrées ($a = 0.4041 \text{ nm}$), fond à 660°C . C'est un métal léger de masse atomique de $26,97 \text{ g.mole}^{-1}$, de numéro atomique $Z=13$ et de masse volumique de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ à 20°C .

Il est caractérisé aussi par [1] :

-Un coefficient de dilatation tel que :

$$\alpha = 23.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ pour l'intervalle de température de } 20^\circ\text{C} \text{ à } 100^\circ\text{C},$$

$$\alpha = 25.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ pour l'intervalle de température de } 20^\circ\text{C} \text{ à } 300^\circ\text{C},$$

$$\alpha = 28.7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ pour l'intervalle de température de } 20^\circ\text{C} \text{ à } 600^\circ\text{C}.$$

-Une capacité thermique massique à 20°C : $C=950 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

-Une conductibilité thermique à 20°C : $\lambda=217.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

-Une résistivité électrique à 20°C : $\rho=2.63 \mu\Omega.\text{cm}$. Ce qui correspond à 65% de celle du cuivre.

I.1.1.2 : Propriétés mécaniques

Les propriétés de l'aluminium non allié recuit sont très faibles ; ainsi pour l'aluminium à 99.5% : une résistance mécanique $R_m=70\text{-}80 \text{ MPa}$, une limite élastique conventionnelle $R_{p 0.2}=10\text{-}20 \text{ MPa}$, un allongement $A\%=50\text{-}60$, un module de Young $E=65\ 000 - 70\ 000 \text{ MPa}$ et un coefficient de poisson $\nu=0,36$ [3].

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.

I.1.1.3 : propriétés chimiques :

L'aluminium est fortement oxydable ($\varepsilon_{\text{Al/Al}^{+3}}^{\circ} = -1.66 \text{ V/ENH}$), mais il se retrouve d'une pellicule d'oxyde (Al_2O_3) épaisse, adhérent, qui protège le métal [1].

Par contre, cette alumine n'a qu'une résistance chimique limitée ; elle résiste cependant bien dans les solutions d'acide chlorhydriques, sulfurique et nitrique. Cependant les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par anodisation : il s'agit d'un traitement qui permet d'obtenir une couche épaisse de Al_2O_3 mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude. Cette anodisation a un but décoratif, car une coloration est possible par des colorants spéciaux avant le colmatage [1,2].

I.1.1.4 : le recyclage de l'aluminium

L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. Les refusions de l'aluminium ne représentent que **5%** de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai. L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des « vieux métaux » montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle de la ferraille [3].

I.1.2 : les alliages d'aluminium

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques très réduites, alors pour améliorer ces propriétés on est conduit à ajouter des éléments entrant en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industriels de plus en plus complexes. Cependant, on peut considérer que ces alliages comportent [1] :

- 1) **Une addition principale** : déterminante pour les propriétés de résistance.
- 2) **Des additions secondaires** : en quantité plus faible qui ont une action spécifique.

I.1.2.1 : Principaux éléments d'alliages de l'aluminium

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

Tableau .I-1 : Effet des éléments d'alliages de l'aluminium

Plusieurs classifications peuvent être effectuées :

- Alliages *corroyés* et alliages de *fonderie*.
- Alliages à durcissement structural et alliages sans durcissement.
- Classification suivant la nature de l'addition principale.
- Classification suivant les domaines d'utilisation...

I.1.2.2 : Les traitements thermiques des alliages d'aluminium

On peut classer les traitements des alliages d'aluminium en trois types [3] :

- Les traitements d'homogénéisation,
- Les traitements d'adoucissement,
- Les traitements de traitement de trempe structurale.

a) : Les traitements d'homogénéisation

Ce sont des traitements comportant un chauffage à température relativement élevée appliquée à certains produits bruts de fonderie ou corroyé et destinés le plus souvent à faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage).[1.3]

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, se sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux pour l'aluminium [1].

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) : Le traitement de trempe structurale

Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comprend une mise en solution solide suivie :

- D'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide existante à des températures plus élevées.

- D'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (=maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

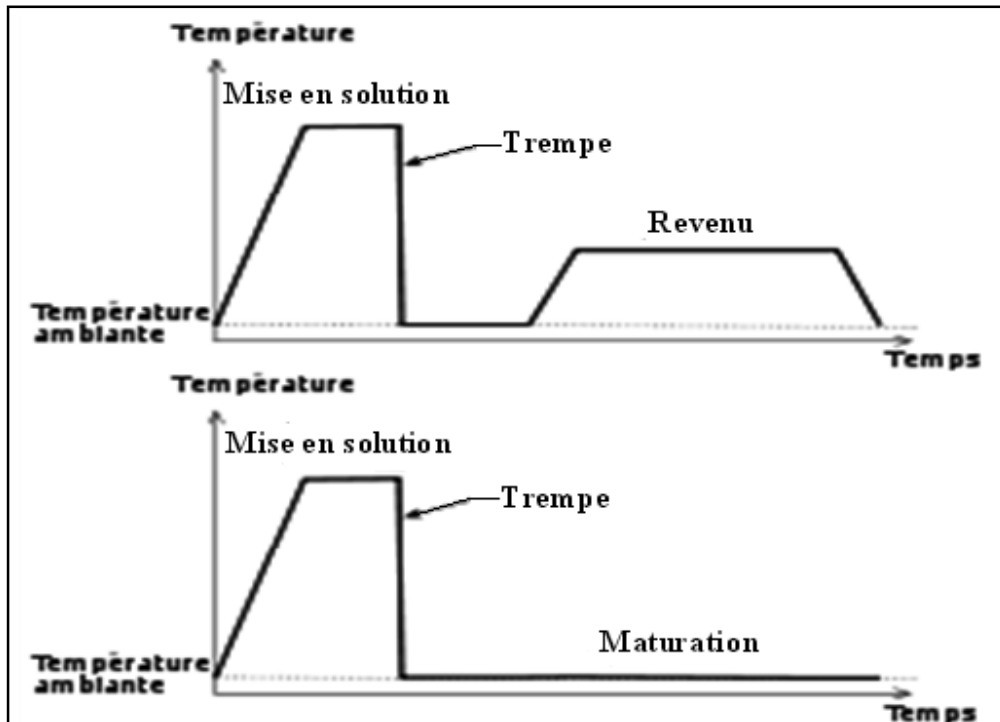


Fig. I-1 : le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium [3].

I.1.2.3 : Les alliages de fonderie :

Les alliages de fonderie sont utilisés pour la fabrication des pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules en sables ou en coquille. Par ce procédé on élabore des pièces aux formes plus ou moins complexes : poignées de portes, blocs moteurs, etc....

Les alliages au silicium sont les plus nombreux parmi les alliages de moulage, ils représentent environ 70% du tonnage des pièces moulées. Ils peuvent être coulés soit en sables, soit en coquille, soit sous pression; leur niveau de caractéristiques mécaniques dépend de la composition et du mode de coulée [2].

a) : Désignation

Il existe plusieurs modes de désignation des alliages d'aluminium de fonderie, dont une numérique (EN 1780-1), une désignation basée sur les symboles chimiques et une désignation complète.

Il existe enfin une désignation métallurgique, utilisée traditionnellement en fonderie et définie par l'ancienne norme française NF A 02-004. Cette désignation est encore aujourd'hui la plus employée en France

Cette désignation est une simplification de la désignation chimique dans laquelle chaque élément est repéré par une seule lettre au lieu de deux, cette lettre n'étant pas obligatoirement la première du symbole chimique (afin de différencier certains éléments comme le manganèse [Mn => M] et le magnésium [Mg => G]).

Le tableau ci-dessous indique les symboles des principaux constituants des alliages d'aluminium :

Élément	Aluminium	Chrome	Étain	Magnésium	Cobalt	Manganèse	Nickel	Silicium	Titane	Cuivre	Zinc
<i>Symbole chimique</i>	Al	Cr	Sn	Mg	Co	Mn	Ni	Si	Ti	Cu	Zn
<i>Symbole métallurgique</i>	A	C	E	G	K	M	N	S	T	U	Z

Tableau .I-2 : Les symboles des principaux constituants des alliages d'aluminium [3]

- Exemple : AlSi7Mg0.6 et AS7G0.6 désignent, suivant ces trois conventions, le même alliage d'aluminium contenant environ 7% de silicium et 0,6% de magnésium.

b) : Fonderie des alliages d'aluminium

La fonderie n'élabore pas elle-même ses alliages, elle achète en lingots les nuances qu'elle est amenée à utiliser. Cependant, lors de la fusion, il est nécessaire de contrôler la composition du métal et d'effectuer quelques ajustements compte tenu de la *perte au feu* [3].

Par exemple, le magnésium (Mg) qui entre dans la composition de nombreux alliages à tendance à *s'évaporer* aux températures de fusion usuelles, bien qu'elles soient nettement inférieures à sa température de vaporisation. Il est nécessaire de compenser cette perte avant de couler :

Le fondeur réalise donc, lorsque son métal est en fusion, une éprouvette de spectrométrie qui est immédiatement analysée.

Généralement, ce n'est pas du magnésium pur qui est ajouté mais un alliage-mère comme l'AG20 qui contient 20% de magnésium et 80% d'aluminium. Une fois le mélange effectué, l'alliage affiné et dégazé ; on réalise une seconde éprouvette pour vérifier l'effet de la correction.

Lorsque le métal est prêt, c'est-à-dire lorsque :

- la température de coulée est atteinte et contrôlée ;
- la composition, notamment la teneur en magnésium, est conformée ;
- le dégazage a été effectué et contrôlé.

On peut couler les pièces définitives dans des moules en sable ou en coquille.

c) : Propriétés générales des alliages de fonderie

Propriétés recherchées : Coulabilité (aptitude à remplir la cavité), absence de fissures lors du retrait et une bonne répartition de la porosité [2.3.4].

Éléments d'alliages en forte teneur : Grande proportion de l'eutectique et abaissement du point de fusion.

-Alliage Al-Cu : [3]

- mauvaise coulabilité (améliorer avec Si).
- Alliage Al-Zn-Mg :
 - Faible coulabilité (porosité),
 - Autotrempant: vieillissement naturel (1 à 2 mois).

-Alliage Al-Mg : [1]

- Excellente résistance à la corrosion,
 - atmosphère marine,
 - eau de mer,
- Coulabilité médiocre.

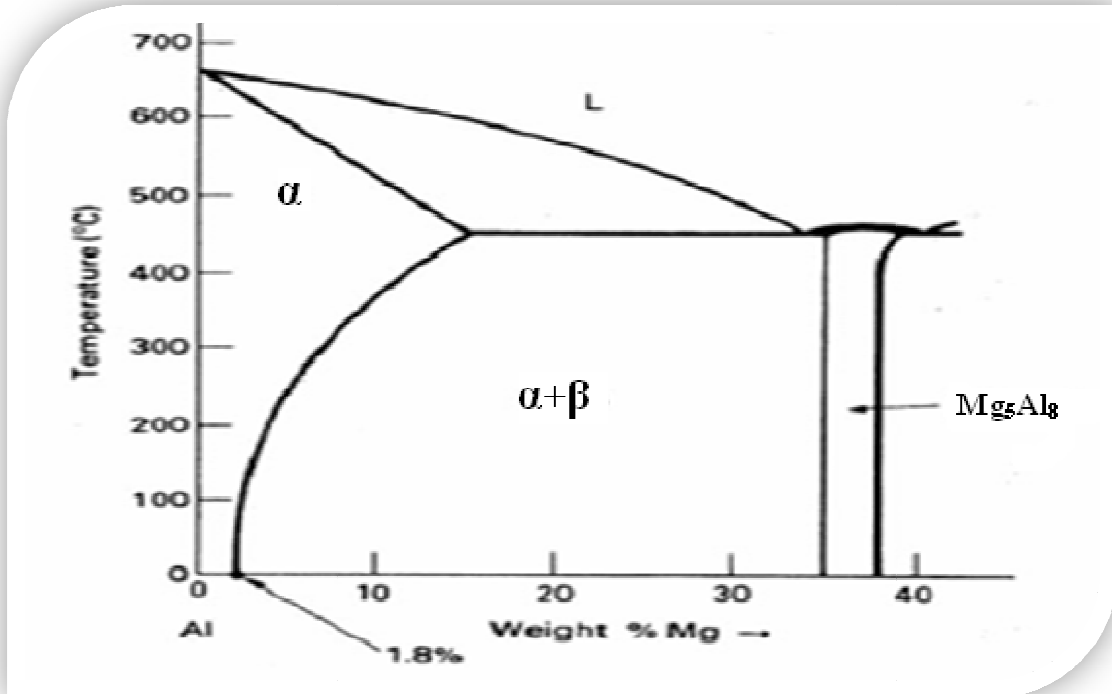


Fig. I-2 : Portion riche en aluminium du diagramme d'équilibre binaire Al-Mg.[1]

-Alliage Al-Si :

Le diagramme d'équilibre Al-Si (fig.I.3) est caractérisé par une eutectique à 12.8% de silicium, et une très faible solubilité de silicium dans l'aluminium. Les microstructures et les propriétés de ces alliages sont fortement influencées par deux éléments : le Sodium et le Phosphore [1.3].

Le sodium : le sodium empêche la formation de cristaux de silicium primaire et change la structure de l'eutectique : l'alliage est dit modifié.

Le phosphore : le phosphore a un effet opposé à celui du sodium : le composé Al P est un germe pour les cristaux de silicium primaire.

Ces alliages sont surtout utilisés au voisinage de cette composition eutectique, comme **alliages de fonderie** : ce sont les **AS 13** (ou alpac) qui ont une aptitude excellente au moulage. Ces alliages sont utilisés dans les cas de pièces peu sollicitées mécaniquement.

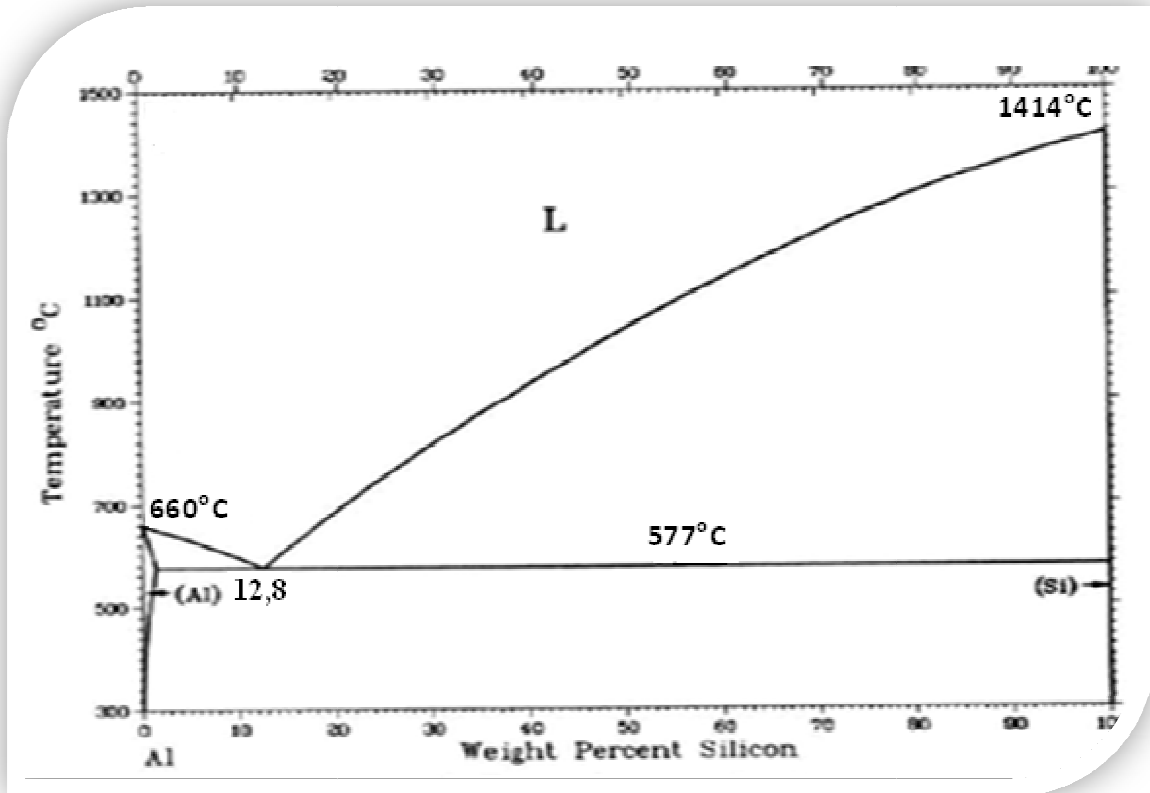


Fig. I-3 : diagramme d'équilibre de l'alliage Al-Si [1.4]

Les alliages Al-Si tels que : Al-Si ; Al-Si-Mg et Al-Si-Cu caractérisent par :

- % Si de l'ordre de 5 à 20%.
- bonne coulabilité et bonne résistance à la corrosion

d): Applications des alliages de fonderie

Les applications des alliages de fonderie (moulage) sont très nombreuses : [2]

- a) Appareils ménagers : bruleurs en AM4,
- b) Bras de suspension automobile en AS7G,
- c) Blocs moteurs, culasses en AS9U3,
- d) Radiateurs de chauffage central en AS12U,
- e) Piston en AS12UN, AS22UN....etc.

I.2 : La projection thermique

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.

En effet, la projection thermique est un traitement de surface par voie sèche visant à améliorer les propriétés du matériau tel que la résistance à l'usure et au frottement, les propriétés thermiques, les propriétés électriques et la protection contre la corrosion.

Tous les systèmes de projection thermique utilisent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir. Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient. C'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement. Les liaisons entre le substrat et la couche déposée sont donc entièrement mécaniques. Le matériau à déposer peut être sous forme de poudre, fil ou baguette. L'apport d'énergie se fait de deux façons : la flamme et l'arc électrique.

La projection thermique occupe une place considérable dans le monde des traitements de surface. Son apparition date de 1909 grâce à l'invention de l'ingénieur suisse Schoop, portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'Aluminium). Dès 1914 des essais de projection par arc électrique furent réalisés [7].

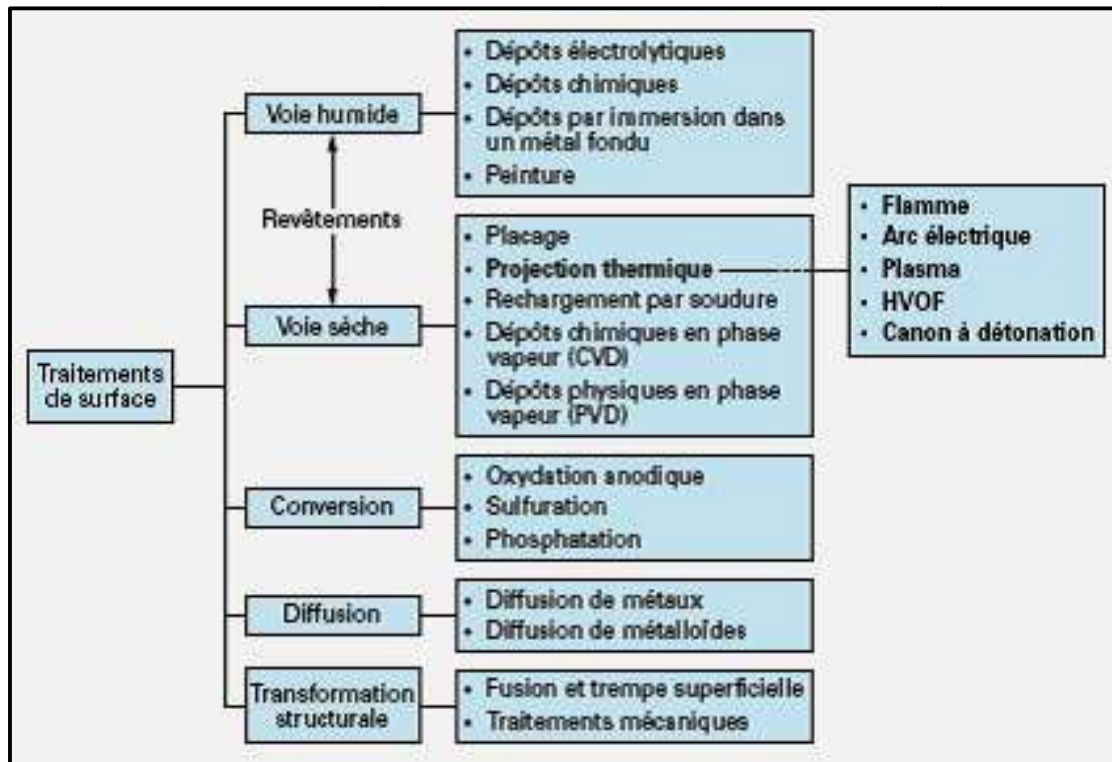


Fig. I-4 : Place de la projection thermique dans les traitements de surface [7]

I.2.1 : Principe de la projection thermique :

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique à l'aide d'une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie [7] :

La figure I.5 présente le principe général de la projection thermique, la matière à déposer sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma) [1,3]. Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir.

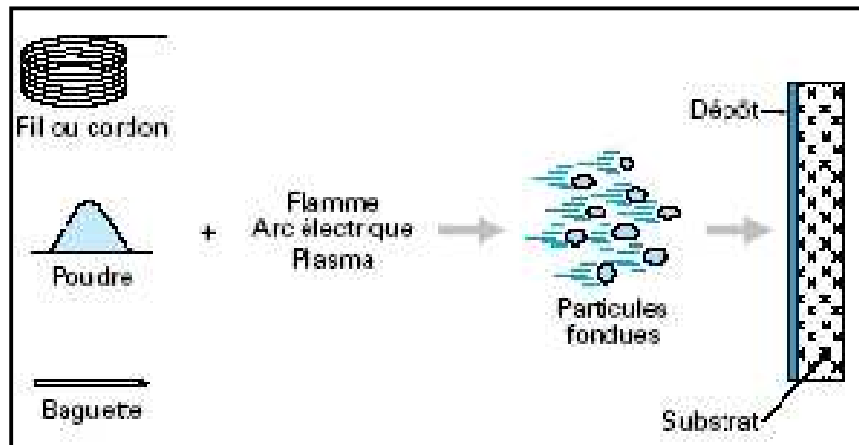


Fig. I-5 : Principe fondamental de la projection thermique [7]

I.2.2 Les différentes caractéristiques des revêtements :

Les différentes caractéristiques du revêtement dépendent essentiellement de la méthode appliquée pour la projection et les différents paramètres qui régissent cette méthode.

Les principales caractéristiques des revêtements projetés sont :

- Structure,
- Adhérence,
- Densité (porosité),
- Dureté.

I.2.2.1: 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, elles forment une juxtaposition de couches qui donnent l'allure générale d'un dépôt obtenu par projection thermique (Fig.I.6) [7].

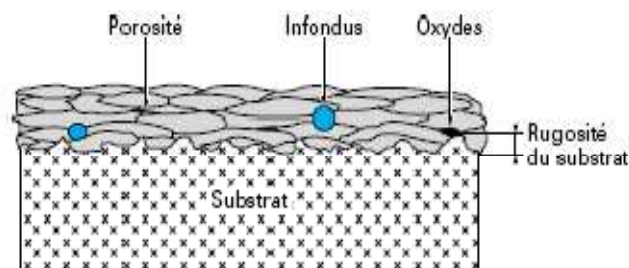


Fig. I-6 : Coupe d'un dépôt projeté thermiquement [7].

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).

Deux types de structures existent après impact :

— *une structure fragmentée* : constituée d'un disque central de faible diamètre et de ramifications dirigées vers l'extérieur, et reliées ou non à celui-ci (fig.I-7) ;

— *une structure en forme de disque* : constituée à partir d'un écoulement continu et stable du liquide, allant du point d'impact de la particule vers la périphérie (fig.I-8).

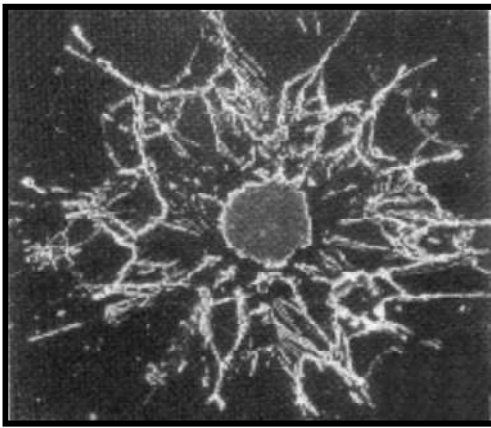


Fig.I-7 : structure fragmentée [7]

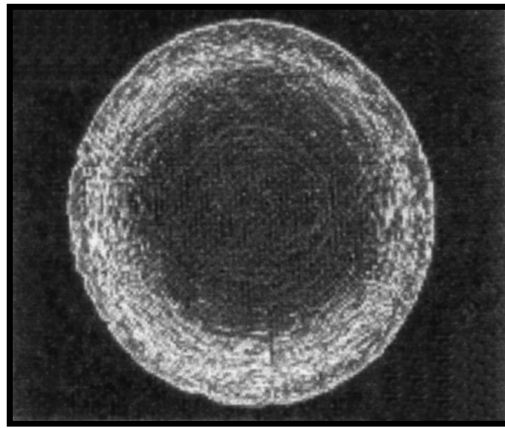


fig.1-8 : structure en forme de disque [7]

I.2.2.2 Adhérence

Les dépôts projetés s'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.

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 150 MPa. [7] 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).

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** [6].

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.[6]

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 (SPS, IPS) ou à vide (VPS). 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 [6].

L'existence de pore 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 un poudre plus fine.

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 [6].

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) [6].

Dans la pratique de projection, la réaction chimique de formation de composés intermétalliques n'était observée que lors de la projection des métaux tels que Mo, W sur les substrats d'acier.

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 [6].

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 [6].

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

Où :

- σ : contrainte résiduelle.
- σ_{st} : contraintes structurales.
- σ_i : contraintes intrinsèques
- σ_t : contraintes thermiques.
- σ_{tr} : contraintes de trempe.
- 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 [6]

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 [6]

$$\sigma_i = -\frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V} \frac{E_d}{1 - \nu_d}$$

Où :

V : est le volume du dépôt par rapport au volume du matériau monocristallin.

E_d : le module de Young du dépôt.

ν_d : le coefficient de poisson du dépôt

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 [6] :

$$\sigma_t = \frac{E_d}{1 - \nu_d} (\alpha_d - \alpha_s)(T_d - T_s)$$

Où :

E_d : le module de Young du dépôt.

ν_d : le coefficient de poisson du dépôt.

α_d : le coefficient de dilatation thermique du dépôt.

α_s : le coefficient de dilatation thermique du substrat

T_d, T_s : les températures de dépôt et de substrat respectivement.

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 [6].

$$\sigma_{tr} = \alpha_d(T_f - T_d)E_d$$

Où :

E_d : le module de Young du dépôt.

α_d : le coefficient de dilatation thermique du dépôt.

T_d : la température de dépôt.

T_f : la température de fusion du dépôt.

b).5 : Les contraintes de transformation de phase : qui résultent de la transformation de phase dans les lamelles. [6]

$$\sigma_{tp} = \frac{E_d(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2})}{3(2\nu_d - 1)}$$

ou :

E_d : le module de Young du dépôt.

ν_d : le coefficient de poisson du dépôt.

ρ_1, ρ_2 : sont les densités des phases avant et après la transformation de phase.

I.2.2.3 : Densité

Les dépôts projetés sont poreux, cette porosité est plus ou moins importante et cela dépend du mode de projection. La dimension et la vitesse des particules ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts pour les projections métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxydes formés au cours de la projection [9].

I.2.2.4 : Dureté

La mesure de la dureté d'un revêtement est une valeur relative, vue la difficulté d'obtenir une valeur exacte dans un matériau hétérogène.

On peut avoir une indication précise de la cohésion des particules entre elles, si on effectue une macro-dureté ou micro-dureté, sous une charge importante, on aura une idée précise de la qualité du dépôt qui craque si la cohésion n'est pas bonne [9].

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type lamellaire.

I.2.3 : Les procédés

Selon la nature du matériau projeté (poudre ou fil), le type de source d'énergie (flamme ou électricité), les processus de projection thermique sont généralement les suivants :

I.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.

Pour les deux premiers procédés, une poudre est introduite dans la flamme et est véhiculée par l'énergie cinétique transmise par les gaz en combustion.

Le moins onéreux et le plus facile d'emploi est **la torche à gaz**. La poudre tombe, puis entraînée par les gaz de combustion vers la flamme qui fait fondre la poudre et chauffe le 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.

a) : Projection de poudre à la flamme

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible (acétylène / oxygène) et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (figure.I-9).

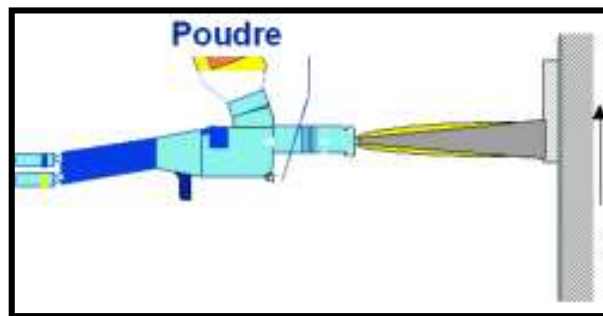


Fig. I-9 : Principe de fonctionnement du pistolet poudre flamme [5]

La poudre fusionnée dans la flamme est projetée sur la surface de la pièce à revêtir.

Le pistolet flamme poudre réalise des dépôts de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle s'effectue sans échauffement du substrat par la flamme. Le matériau d'apport est le même que précédemment mais la projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques ou de polymères est aussi possible.

Le procédé flamme poudre est utilisé pour l'isolation thermique, l'usure ou encore la corrosion

b) : Projection de fil à la flamme

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de baguette, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé (figure.I-10).

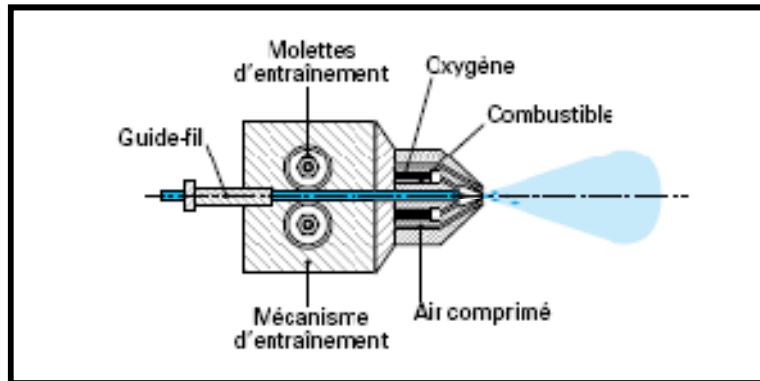


Fig. 1-10 Projection de fil à la flamme [7]

Cette technique permet de réaliser des dépôts de métaux, d'alliages de base zinc, cuivre, nickel ou étain et de céramiques sous forme de baguettes. L'épaisseur des dépôts va de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Ce procédé est utilisé dans tous les domaines industriels

c) : Projection flamme avec refusion

Les revêtements réalisés par projection thermique sont poreux et leur liaison avec le substrat est purement mécanique. Pour des problèmes de corrosion et/ou d'adhérence insuffisante, un traitement de refusions peut compléter la gamme opératoire de manière à densifier le dépôt et à assurer une bonne liaison.

Les alliages utilisés pour ces dépôts sont des alliages à base Ni ou Co contenant des éléments d'addition tels que le bore (> 1 %), le silicium (2 à 5 %), le chrome (10 à 20 %), et pouvant être chargés en carbures (jusqu'à 70 %).

Les dispositifs utilisés sont les torches à gaz avec lesquelles les opérations de projection et de refusion sont réalisées simultanément. La refusion est alors réalisée soit à l'aide d'une torche oxyacétylénique ou oxypropane, soit à l'aide d'un dispositif à induction [6].

d) : Projection hypersonique à tir continu

Cette variante des procédés à flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion [7].

Les dépôts possèdent une faible porosité (inférieure à 2%), une bonne adhérence et une bonne densité ainsi qu'une faible rugosité. Les poudres utilisées sont des métaux et des alliages à base de nickel et cobalt surtout, des carbures [6.7].

L'aéronautique est le principal utilisateur de ce procédé.

Le choix des gaz de projection est important dans le rendement et la qualité du dépôt et dépend de nombreux paramètres comme le coût, le stockage, la sécurité ou leurs caractéristiques physiques (température de flamme, pression de travail)

L'oxygène est utilisé comme comburant, les gaz combustibles sont l'acétylène le propylène des mélanges ou des hydrocarbures comme le propane.

Deux procédés sont développés, leur différence tenant essentiellement à des critères d'ordre économique :

- Le procédé *HVOF*: High Velocity Oxygen Fuel;
- le procédé *HVAF* : High Velocity Air Fuel.

d).1 : Le procédé HVOF

Le carburant ou le gaz comburant et l'oxygène sont mélangés dans la chambre de combustion après passage à travers d'orifices calibrés.

La combustion est stable, uniforme et provoque une pression constante. La forme et les dimensions de la tuyère d'éjection permettent de réaliser un jet gazeux supersonique et une zone à basse pression pour l'introduction radiale de la poudre.

La vitesse de sortie des particules est en relation directe avec la pression de la chambre de combustion.

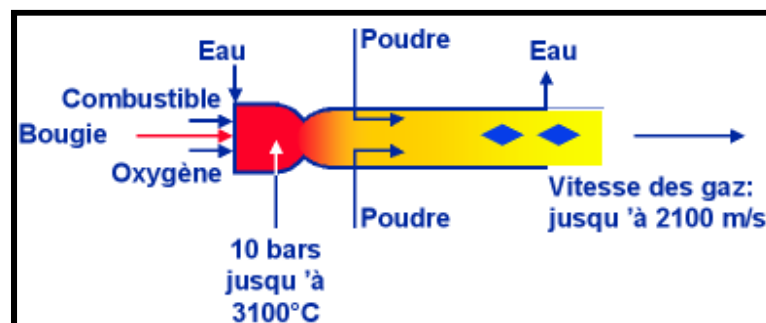


Fig.1-11 : Principe de fonctionnement d'un pistolet HVOF [5]

La poudre fusionnée est projetée sur la surface de la pièce à revêtir.

d).2 : Le procédé HVAF

Ce procédé est similaire au celui de HVOF, sauf que l'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène - air comprimé pour la combustion

e) : Projection hypersonique à tir discontinu

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé *canon à détonation* (figure.I-12), en même temps que le gaz de combustion (oxygène, acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée et éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée. [7]

Le régime de projection est donc discontinu. Entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Ce type d'installation permet d'obtenir des dépôts de caractéristiques remarquables du point de vue de la compacité (porosité inférieure à 1 %), de l'adhérence (souvent supérieure à 80 MPa) et de la rugosité ($Ra = \pm 3 \text{ mm}$), à des taux horaires de dépôts compris entre 3 et 5 kg/h. Les épaisseurs de dépôts sont en général limitées à 0,2 mm. [7.8]

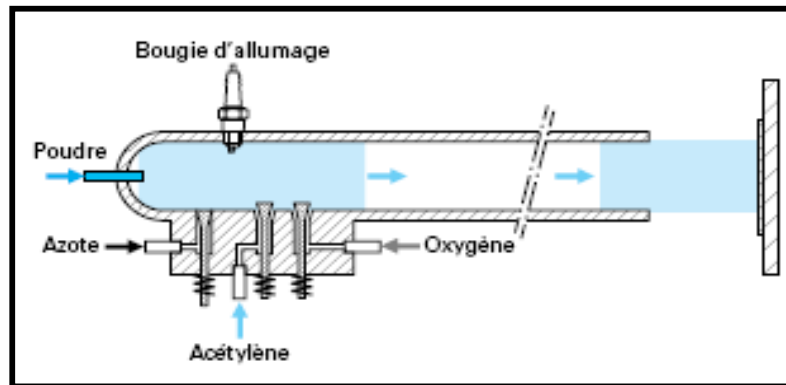


Fig.1-12 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [7]

Les poudres utilisées sont les carbures de chrome ou de tungstène liés par du nickel ou du cobalt, l'alumine ou l'oxyde de chrome.

Les dépôts obtenus ont l'avantage d'être très compacts (porosité inférieure à 1%), d'avoir une bonne adhérence. L'épaisseur du dépôt reste en général inférieure à 0,2 mm.

Les domaines de l'aéronautique, la sidérurgie, la chimie ou le textile utilisent ce procédé assez contraignant par ses dimensions et ses nuisances sonores.

II.2.3.2 : Projection à l'arc électrique

a) : Projection de fil à l'arc électrique

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.[6,7]

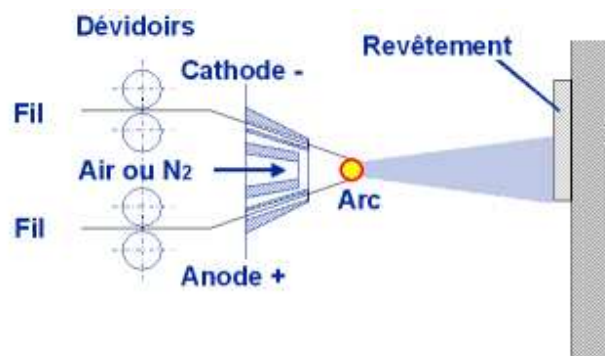


Fig. I-13 : Principe de fonctionnement d'un Torche a arc électrique [5]

..

Les dépôts ont une épaisseur de 0,2 à 3 mm avec une porosité de 5 à 10%.

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

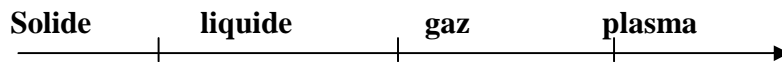
Les matériaux projetés doivent être conducteurs. Les plus fréquemment utilisés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre, le molybdène et les aciers. Le développement des fils fourrés avec des alliages tels que NiCrAl ou NiMoAl, des fils chargés en carbure de chrome ou des composites permet de nouveaux types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

Le fait que les matériaux à projeter doivent être conducteurs constitue aussi un frein à l'utilisation de cette méthode de projection. Néanmoins l'avantage du processus de projection à l'arc fil reste indéniablement son taux de déposition élevé le rendant parfait pour les grandes régions ou pour les applications de production de grand volume. La projection des grandes structures telles que les ponts et les plateformes off-shore avec des revêtements de zinc ou

d'aluminium résistant à la corrosion, et la projection des composants des boîtiers électroniques avec revêtements conducteurs de cuivre ou d'aluminium [2.7]

b) : Projection au plasma atmosphérique (APS)

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



C'est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre. Un plasma Ar/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻ [7].

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.

Un plasma gazeux est initié par un arc électrique confiné (12 000 à 20 000 °K). Il est étranglé dans une tuyère d'où il s'échappe avec une vitesse élevée. On injecte alors la poudre dans ce jet de plasma grâce à un gaz porteur en général de l'argon. Les particules fondent et sont projetées sur le substrat par ce jet de gaz [6].

Un intérêt de cette technique réside dans la diversité de substances projetables. Ainsi les métaux, les alliages, les céramiques, les carbures et les cermets peuvent être utilisés. La projection plasma nécessite un équipement important : une torche de projection, une armoire de commande et de régulation, un générateur de courant continu et un distributeur de poudre; les installations sont en général entièrement automatisées ou robotisées [6,7].

L'industrie automobile et l'industrie aéronautique utilisent ce procédé pour lutter contre l'usure, la corrosion, l'oxydation, les chocs thermiques ou les frottements. La projection peut être effectuée sous vide ou atmosphère contrôlée, ce qui permet des dépôts très épais jusqu'à plusieurs millimètres avec une température plus basse. Mais le coût d'une telle installation est très élevé et limite son utilisation à des applications très pointues comme le dépôt de carbure de bore dans le domaine nucléaire.

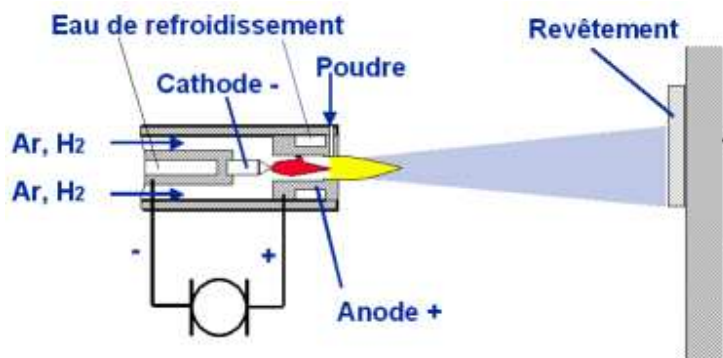


Fig. I-14 : principe de fonctionnement d'une torche plasma [5]

En effet, dans le domaine technique, le terme plasma désigne un gaz utilisé comme conducteur de l'électricité par ionisation et dans certains cas par dissociation. Il est décrit comme le quatrième état de la matière et ne s'apparente pas aux trois autres.

L'état de plasma est obtenu par la décharge d'un arc électrique de haute puissance entre une cathode et une anode, à l'intérieure d'une torche refroidie.

La poudre fusionnée est projetée sur la surface de la pièce à revêtir.

La projection de plasma comporte l'avantage de pouvoir être utilisée sur les matériaux avec des points de fusion élevés tels que la céramique ou les métaux réfractaires. Il s'agit d'une méthode de projection polyvalente pour des revêtements de haute qualité et utilisés pour un vaste choix d'applications, y compris les revêtements sur les surfaces de traction, les revêtements pour barrière thermique sur les chambres à combustion, les turbines, les vannes et les pales, les revêtements biocompatibles d'hydroxylapatite pour les implants et les revêtements de céramique sur les rouleaux d'imprimerie [2.8].

I.3 : Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables constituent une vaste famille d'alliages métalliques. Ces aciers ont pénétré de nombreux domaines industriels (bâtiment, industries chimiques, agroalimentaires, industrie de transports et maritime, tubes...)

Leurs extraordinaires développements résultent à la disponibilité à grande échelle des métaux entrant dans leur composition, c'est-à-dire le chrome, le nickel, le molybdène Etc.

Ils présentent un rapport qualité/ coût très attrayant pour de nombreux marchés spécifiques reconnus pour l'agressivité des milieux réactionnels (chimie, pétrochimie, eau de mer, pâte à papier...). La variété des domaines d'application a également conduit à une optimisation de la composition chimique en fonction des propriétés en service requise.

I.3.1: Structure métallurgique et rôles des éléments d'addition

I.3.1.1 : Les éléments d'addition

a) : Le chrome

Les aciers inoxydables sont des alliages fer-chrome ou plus exactement acier-chrome c'est-à-dire fer-carbone-chrome. Conformément à la norme européenne EN 10088-1, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 12 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone [11].

C'est le chrome qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion.

b) : Le carbone

Le carbone est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers en élargissant le domaine austénitique, sa teneur est maintenue très basse pour des raisons de corrosion et Soudabilité. Il contribue à la stabilisation de l'austénite lors de déformation à froid.

c) : Le nickel :

Le Nickel favorise la formation de structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion. Le manganèse est un substitut du nickel. Certaines séries d'alliages austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel. [11]

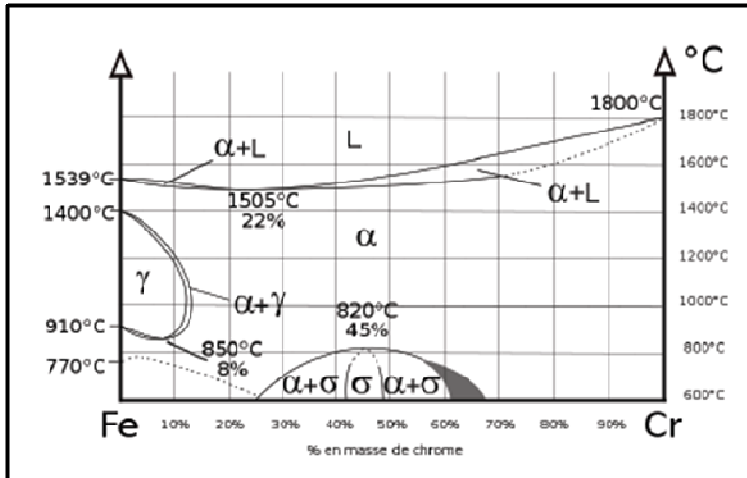


Fig. I-15 : diagramme de phase Fe-Cr. [14]

d) : Le molybdène et le cuivre :

Ils améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation. [13]

e) : Le tungstène :

Il améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques. [1.14]

f) : Le titane :

Il doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane [11.12].

g) : Le niobium :

Il a un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique. [11.14]

h) : Le silicium :

Il joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydants (acide nitrique concentré ou acide sulfurique concentré à chaud) [12].

I.3.1.2 : Système fer- chrome

Le fer pur possède trois formes allotropiques en fonction de la température :

- jusqu'à 910 °C (point A3): forme alpha (α), ferrite (cubique centré),
- de 910 à 1400 °C (point A4): forme gamma (γ), austénite (cubique face centrée),
- de 1400 à 1538 °C (température de fusion), forme delta (δ), ferrite (cubique centré).

Le chrome est un élément dit alphasène. Il favorise fortement la forme ferritique, sur le diagramme de phase Fe-Cr, le domaine austénitique est assez réduit et est représenté par un domaine limité appelé *boucle gamma*. [14]

Pour des teneurs supérieures à 11,5% de chrome, l'alliage reste ferritique dans toute la plage de température. Il y a disparition de la transformation allotropique α - γ . Entre 10,5 et 11,5% de chrome, l'alliage est biphasé ferrite + austénite dans certaines plages de température. Il subit une transformation ferrite/austénite pour des teneurs inférieures à 10,5%. [13]

On notera, que le chrome entre 0 et 8% abaisse la température A3 et se comporte comme un élément gammagène. Ce comportement s'inverse pour des teneurs supérieures à 8%. Point à partir duquel cette température augmente. Pour certaines teneurs de chrome, dans le cadre d'un refroidissement lent, il peut y avoir formation de phase intermétallique sigma (σ) à des températures inférieures à 820 °C. Elle précipite au joint de grain ou dans la matrice ferritique entraînant une fragilité. [1]

I.3.1.3 : Système fer- chrome- nickel

Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel.

Le nickel est à l'opposé du chrome un élément dit gammagène. Il ouvre le domaine austénitique. Concrètement, l'addition de nickel augmente la taille de la *boucle gamma*. [1.11]

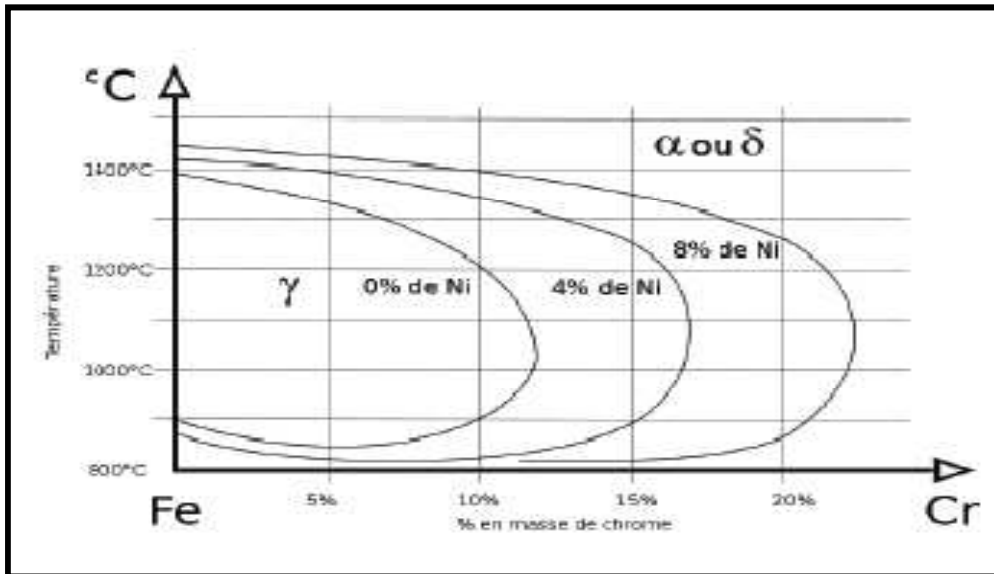


Fig. I-16 : évolution du domaine γ avec la teneur en Ni [14]

I.3.1.4 : les éléments α -gènes et γ -gènes

D'autres éléments ont un rôle alphasgène ou gammagène. Un rôle particulier est tenu par le carbone et l'azote. Le carbone a un rôle gammagène et rentre donc en "compétition" avec le chrome. En fait plus que le carbone seul, c'est le couple carbone-azote dont il faut tenir compte. Ces deux éléments étant des éléments d'alliage d'insertion contrairement aux autres éléments qui sont des éléments de substitution. [14]

Les éléments alphasgènes sont le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène, l'aluminium et le tantale. Les éléments gammagènes sont le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse. Le manganèse peut avoir un rôle plus complexe (Diagramme de Pryce et Andrew fig.I-17). Plusieurs modèles approximatifs ont été mis au point pour prévoir le comportement de l'alliage en fonction de la composition globale de l'alliage. Les teneurs sont affectées de coefficients établis par expérience afin de tenir compte du poids de chacun des éléments.

Pour les produits laminés, il existe le modèle de Pryce et Andrew donnant les équations suivantes : [1]

- **chrome équivalent : (Cr) eq** = (%Cr) + 3(Si%) + (%Mo) ;
- **nickel équivalent : (Ni) eq** = (%Ni) + 0.5 (%Mn) + 21(%C) + 11,5(%N).

On remarquera le poids important du carbone et de l'azote.

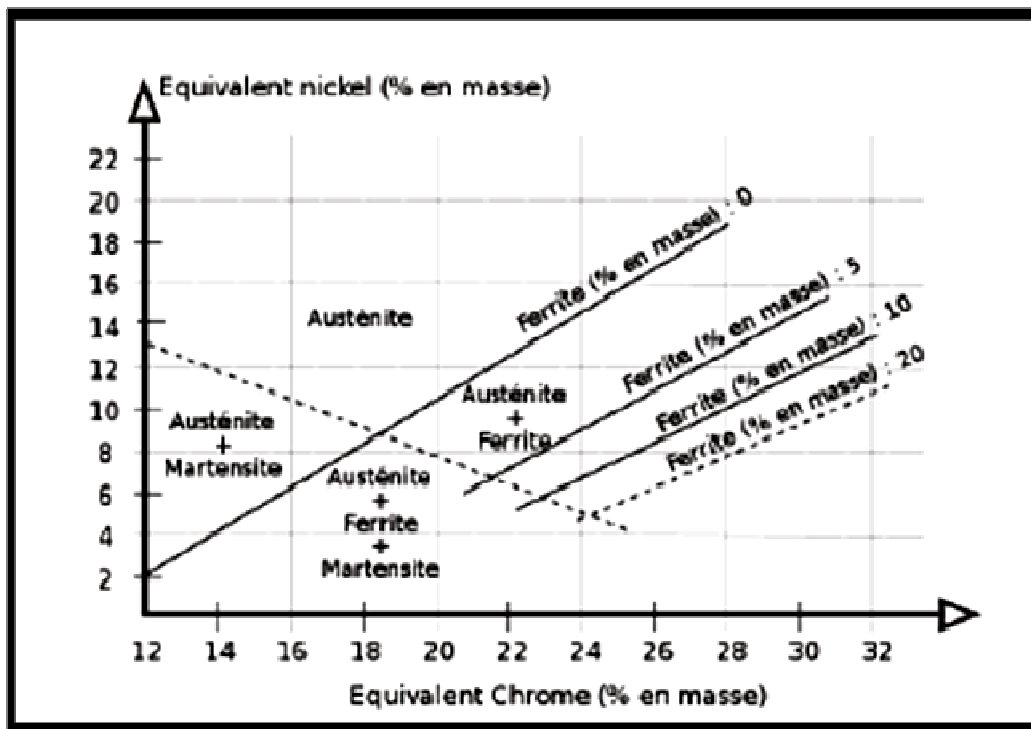


Fig. I-17 : diagramme de PYRCE et ANDREW [14]

Il existe également le modèle de Schaeffler pour les aciers inoxydables à l'état brut de soudage

Modèle de Schaeffler :

- chrome équivalent : $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 1,5(\%Si) + (\%Mo) + 0,5(\%Nb)$
- Nickel équivalent : $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 30(\%C)$.

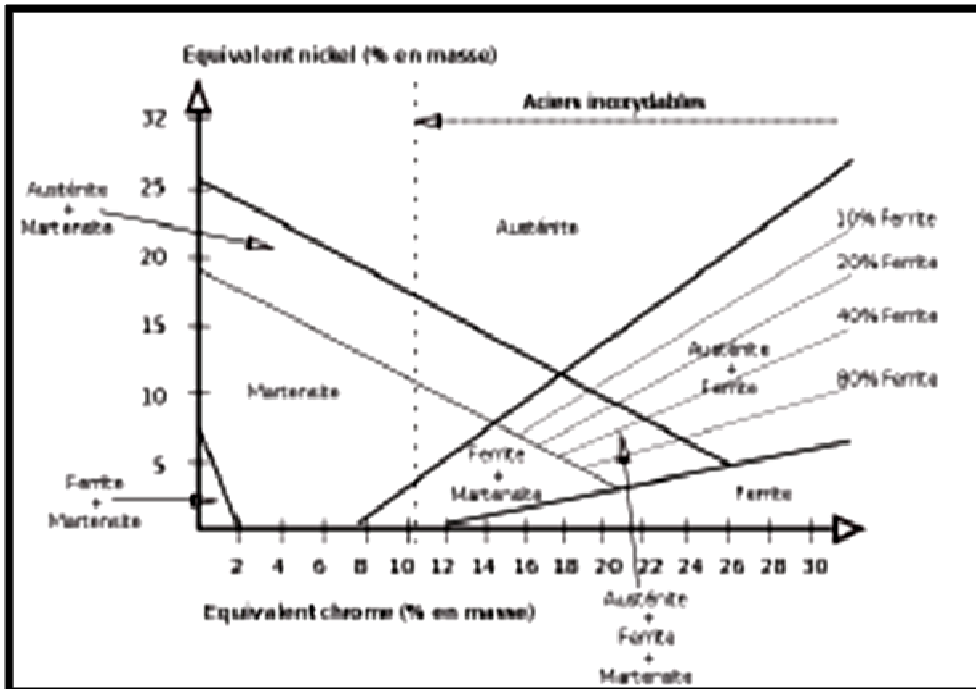


Fig.I-18 : Diagramme de Schaeffler [14]

I.3.2 : Types d'aciers inoxydables

On distingue les quatre familles d'aciers inoxydables suivantes :

I.3.2.1 : Les aciers martensitiques

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel. [1] Exemples : X20Cr13, X46Cr13, X29Cr13.

I.3.2.2 : Les aciers ferritiques

Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %). Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique). [1.11]

Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17.

I.3.2.3 : Les aciers austénitiques

Ce sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre ou du laiton, et aussi de leurs bonnes caractéristiques

mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition tournent autour de 18 % de chrome et 10 % de nickel. La teneur en carbone est très basse et la stabilité améliorée par des éléments tels que le titane ou le niobium. Ces aciers sont aussi utilisés en compétition avec les alliages légers et l'acier à 9% de nickel pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie. [1.14] Exemples : X2CrNi18-9, X2CrNiMo17-12-2.

I.3.2.4 : Les aciers improprement dénommés "austéno-ferritiques"

Ils ont des propriétés de résistance à la corrosion intergranulaire ainsi qu'en eau de mer remarquables et présentent, pendant l'essai de traction, un palier élasto-plastique. Ils ont un comportement mécanique semblable aux aciers de construction. La transformation liquide / solide se traduit par une solidification en phase ferritique (ferrite delta) puis d'une seconde transformation, à l'état solide, en austénite. Ils devraient donc, en conséquence, être dénommés aciers Ferrito-austénitiques. Le simple fait de désigner correctement ces aciers permet de comprendre qu'un refroidissement lent, pendant le soudage, permettra un minimum de phase austénitique de se transformer en phase ferritique. Par contre un refroidissement rapide aboutira à un gel de l'austénite laissant peu de possibilités à la transformation ferritique. Exemple : [1.14] X2CrNiN23-4.

La connaissance des types d'acier est essentielle pour les systèmes constitués d'éléments assemblés mécaniquement ou par soudage, l'assemblage de deux aciers inoxydables trop différents dans un électrolyte peut en effet provoquer des phénomènes de corrosion électrochimique très destructeurs.

I.4 : Le molybdène

Longtemps considéré comme un métal rare, le molybdène n'a véritablement suscité un intérêt qu'au cours de la Première Guerre mondiale en tant que substitut du tungstène dans les aciers.

Ses applications et celles de ses alliages mettent à profit l'ensemble de ses propriétés telles que la haute température de fusion, le grand module d'élasticité, une résistance mécanique élevée à haute température, leur bonnes conductivités électrique et thermique et une excellente résistance à la corrosion dans de nombreux milieux

I.4.1 : Principale caractéristique de molybdène

I.4.1.1 : les caractéristiques physiques

Le molybdène est le trente-sixième élément par ordre d'abondance dans la couche terrestre. Élément de transition entre le chrome et le tungstène, il est le second élément du sixième groupe de la table périodique des éléments (VI A) et possède deux couches électroniques externes incomplètes. Son réseau cristallographique est cubique centré et le paramètre correspondant vaut 0,31472 nm à 25 °C. Sa masse volumique est de 10,22 g/cm³. Son numéro atomique est de 42 et sa masse atomique est de 95,95 g/mole [15].

Il a une Tension superficielle à la fusion de 2 240 mN.m⁻¹, un coefficient de dilatation linéique, le plus bas des métaux purs. Il a aussi une bonne conductivité thermique et une faible capacité thermique rendent le molybdène résistant aux chocs thermiques. (tableau.5)

Tableau 3 – Propriétés thermiques du molybdène			
Température	Coefficient de dilatation linéique	Conductivité thermique	Capacité thermique massique
(°C)	(en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
20	142 (394 pour le cuivre)	247
100	5,2	138	260
500	5,7	121	285
1 000	5,75 (20 pour le cuivre)	105	310
1 500	6,51	84	339
2 000	7,2	82	440
2 607 (liquide)	570

Tableau.I-3 : propriétés thermique de molybdène [15]

I.4.1.1 : Les caractéristiques mécaniques

La dureté, la limite d'élasticité et la résistance augmentent avec le taux d'écroutissage et diminuent quand la température de réchauffage augmente. Cependant Comme tous les métaux à réseaux cubiques centrés, le molybdène a un seuil de température au-dessous duquel on ne peut le déformer à cause de sa grande dureté et de sa fragilité. Au-dessus de cette température le molybdène devient ductile ; cette température, appelée **température de transition ductile fragile**, se situe autour de la température ambiante, mais est très sensible aux conditions de transformation et à la vitesse de déformation [15].

Il est caractérisé aussi par :

Un module d'élasticité tel que :

- $E = 320\,000$ MPa à 20 °C
- $E = 270\,000$ MPa à $1\,000\text{ °C}$
- $E = 240\,000$ MPa à $1\,500\text{ °C}$
- $E = 160\,000$ MPa à $2\,000\text{ °C}$

Un module de rigidité à 20 °C = $120\,000$ MPa

Un coefficient de compressibilité à 20 °C = $0,35$ Pa

Un coefficient de Poisson à 20 °C = $0,32$

I.4.2 : Les applications du molybdène

- Les industries électrique et électronique
- Dans l'industrie des fours à haute température
- Dans l'industrie chimique, le molybdène est utilisé soit pour des pièces finies, soit comme matière première. Les pièces finies (tubes, membranes, trémies, revêtement d'autoclave, etc
- Les industries du verre et de la céramique
- les revêtements par métallisation

Chapitre II :

Techniques expérimentales

II. Techniques expérimentales

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 et caractériser les dépôts.

II.1 : Matériaux utilisés :

II.1.1 : Les substrats

Les deux alliages d'aluminium de fonderie qui font l'objet de notre étude sont Al-Si 13% Et Al-Mg 20% et les pièces à obtenir sont des tôles de dimensions (10×50×100) mm.

II.1.1.1 : Le moulage des pièces

La fusion du métal se fait dans un four électrique, la masse métallique subit un traitement de dégazage et un traitement de modification en introduisant :

- a) : **Un produit de dégazage** : C'est un produit à base d'exachlorethane sous forme de poudre, il est introduit au fond du bain métallique à une température de 720⁰C à l'aide d'une cloche, selon un taux de 0,2 % à 0,4 % du poids totale du bain.
- b) : **Un produit modificateur** : C'est un mélange de sel de chlorure et fluorure de sodium, il est sous forme de poudre fine, cette poudre est introduit au fond du bain à une température supérieur 750⁰C.
- c) : **Un produit pour protection du bain** : Ce produit est répandu en surface après la fusion complète de la charge (0.3% à 1% du poids totale du bain) puis on procède au décrassage .

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules en sable.

Différentes opérations de parachèvement ont été effectuées telles que :

- **Décochage et sablage des pièces obtenues.**
- **Ébarbage.**

Après le parachèvement des pièces on a procédé à découper ces pièces en éprouvettes de dimension (15x15x10) mm³

II.1.1.2 : Composition chimique

Les tableaux tableau II-1 et tableau II-2 présentent la composition chimique des alliages Al-Si 13% Et Al-Mg 20% selon la norme NF A57-702

<i>Éléments chimiques</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Sn</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>
<i>%concentration</i>	<i>0,70</i>	<i>11-13,5</i>	<i>0,10</i>	<i>0,15</i>	<i>0,10</i>	<i>0,50</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,15</i>	<i>0,05</i>

tableau-II-1 : composition chimique de l'alliage Al-Si 13%

<i>Éléments chimiques</i>	<i>Mg</i>	<i>Fe</i>	<i>SI</i>	<i>Autres</i>	<i>Aluminium</i>
<i>%Concentration</i>	<i>19.5 à 20.5</i>	<i>0.30</i>	<i>0.15</i>	<i>0.14</i>	<i>Le reste</i>

tableau-II-2 : composition chimique de l'alliage Al-Mg 20%

II.1.1.3 La préparation des surfaces pour la projection.

La métallisation pour être efficace, exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile ; il est utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir:

- a) : la propreté :** La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue par le **Dégraissage** et le nettoyage avec la solution d'acétone.
- b) : La rugosité :** Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface. Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons utilisé le grenailage qui consiste à cribler la surface par un jet de particules métalliques (grain de corindon de 4 à 7) μm de diamètre qui permet d'obtenir une surface prête pour recevoir le dépôt.
- c) : Le préchauffage:** Le préchauffage peut être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteinte. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement.

La surface d'un substrat est activée pour obtenir et améliorer l'adhérence d'un dépôt .on distingue deux types d'adhérence dépendant des phénomènes physico-chimiques qui ont lieu :

-lors de formation de dépôt : **adhérence intrinsèque**.

Lors de l'utilisation de dépôt : **adhérence en service**.

L'adhérence intrinsèque dépend de [6] :

- L'état de surface de substrat, et par conséquent, de **l'énergie de surface** ;
- La similitude de nature chimique et en particulier, celle des **mailles cristallines** du dépôt et de substrat.
- La forme et **l'énergie de surface** des espèces constituant le dépôt ;
- La différence entre **les coefficients de dilatation thermique** du revêtement et de substrat dans le cas où le dépôt est réalisé à la température bien supérieure à la température ambiante.

L'adhérence en service correspond aux phénomènes ayant lieu lors de l'utilisation de dépôt, par exemple comme barrière thermique ou comme protection d'un outil de coupe, et dépend à son tour de :

- La nature et la valeur des sollicitations mécaniques, telles que par exemple **les contraintes de cisaillement ou de compression**.
- La différence entre les constantes mécaniques, surtout celle du **module de Young**, du revêtement et de substrat.

Ainsi, l'énergie d'adhésion peut être définie comme la différence entre deux états. Celui où deux surfaces sont libres et celui pour lequel dépôt et substrat sont liés. L'énergie d'adhésion est donc la somme de toutes les interactions interatomiques physico-chimiques à l'interface.

Elle s'écrit, selon Dupré :

$$\boxed{W_{adh} = \gamma_D + \gamma_S - \gamma_{DS}}$$

Avec :

γ_D et γ_S : sont respectivement les énergies de surface du dépôt et du substrat.

γ_{DS} : est l'énergie d'interface.

II.1.2 : Le dépôt projeté :

Les dépôts projetés sont un acier inoxydable de nuance industrielle 55E dont la composition nominale est donnée dans le tableau II.3 ; et le molybdène industriel.

Éléments	Fe	C	Cr	Ni	Si	Mn
%massique	68.04	0.025	18.88	10	0.85	1.8

Tableau II.3 : Composition chimique des fils en acier inoxydable 55E

Ces dépôts d'acier inoxydable et de molybdène sont été réalisés moyennant la technique de projection à arc entre 2 fils (fig.II-18) où les deux fils sont soit en acier inoxydable 55 E, ou en molybdène.

II.1.3 : 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 ce tableau

Pression d'air dans le moteur	3,7bars
Pression d'air dans la buse de projection	3,5 bars
Tension du générateur	32V
Intensité du générateur	100A
Distance de projection	120-130 mm
Angle de tir	90°

Tableau II.4 : les paramètres de projection

Le système de projection par arc électrique comprend un pistolet ayant un ensemble d'alimentation en puissance électrique et en fils. L'arc électrique est réalisé à la sortie de la buse par le contact entre les 2 fils. Le dispositif expérimental est décrit dans la figure (fig.) ; une couche de fil fondu est déposée par le passage du pistolet plusieurs fois sur la surface d'un même échantillon.

La projection est réalisée sans couche d'accrochage.



Fig.II-18 : Pistolet de projection à arc électrique « Arc spray 234 »[17]

II.1.3 : Métallographie

La métallographie est une technique qui est basée sur l'observation de la microstructure des échantillons en utilisant un microscope optique. Avant d'observer les échantillons par le microscope, il faut préparer la surface de ces derniers.

II.1.3.1 : Polissage

Avant de faire le polissage, on a fait des coupes transversales pour les échantillons à étudier à l'aide d'une micro tronçonneuse

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'éventuelles risques d'échauffement de la pièce et aussi on doit changer la position de la pièce de 90° en passant d'un papier à un autre.

Après tout ces étapes, les échantillons sont finis à l'aide d'un drap de tissu mouillé de la pâte diamantée sur lequel on pose notre surface, on prolonge son action jusqu'à ce que les raies issues du produit précédent disparaissent .Il faut que cette étape nous permet d'avoir une surface comparable à un miroir.

II.1.3.2 : Analyse micrographique

La micrographie est la méthode utilisée pour contrôler la qualité du dépôt. Cette étude est faite à l'aide d'un microscope métallographique optique en lumière directe.

Afin de révéler la structure des couches projetées au niveau de l'interface, on fait une prise de photos sur la coupe transversale. Cette analyse nous a permis de porter les premières remarques concernant l'adhérence du dépôt.

Chapitre III :

Résultats et interprétation

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats issus des différents essais effectués sur les deux alliages d'aluminium AG35 et AS13.

III.1 : État métallographique des alliages d'aluminium

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 la figure III.1 et la figure III.2 à différents grossissement.

Après l'inoculation de l'AS13 au sodium, la structure globulaire eutectique apparaît sur la figure III.3 et la figure III.4 à différents grossissement.

Concernant l'alliage AG35, la figure III.5 et la figure III.6 à différents grossissement, présentent une structure eutectique dendritique à orientation aléatoire avec la présence des porosités.

Après l'inoculation au sodium, les porosités sont réduites et on constate la disparition de la structure dendritique, et une globulisation fortement accentuée apparaît sur la figure III. 7 et la figure III.8 à différents grossissement, ce qui se traduit par une structure eutectique correspondant à un mélange ($\alpha+\beta$).

Donc, la composition chimique en Mg correspond effectivement à une valeur proche de l'eutectique qui est de 35% de Mg.

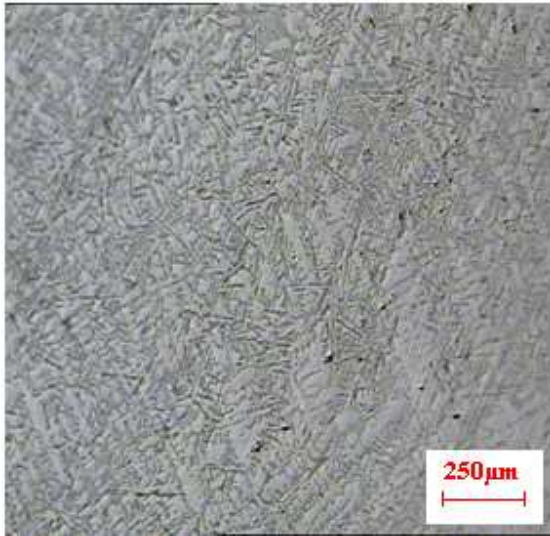


Fig.III.1 : AS13 non modifié

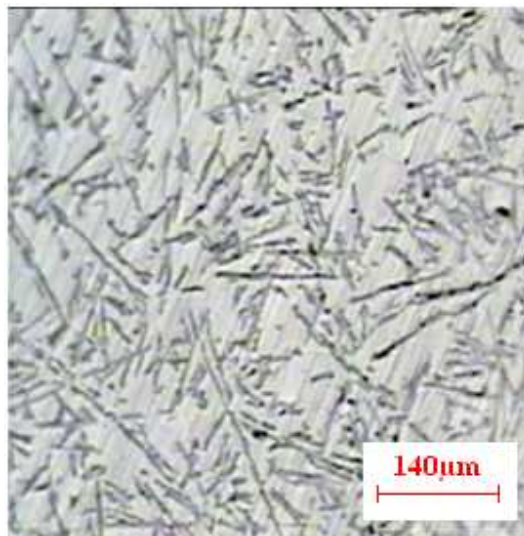


fig.III.2 : AS13 non modifié

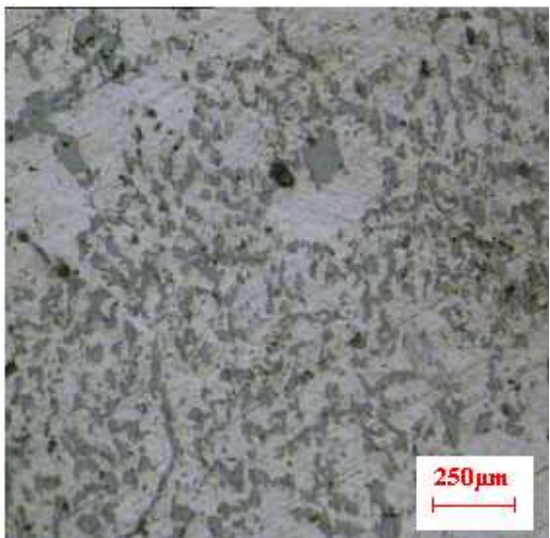


Fig.III.3: AS13 inoculé au Na

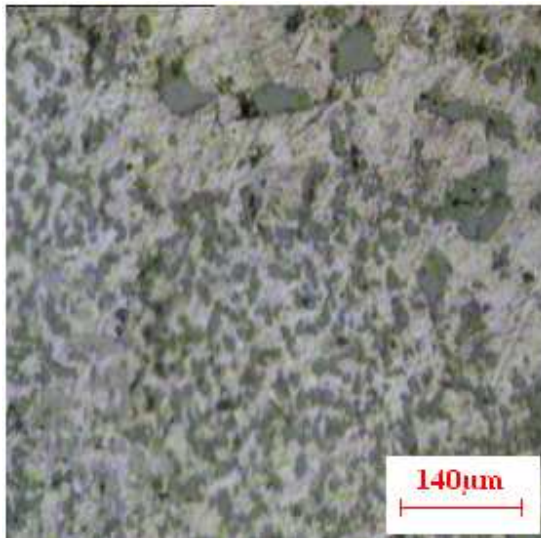


fig.III.4: AS 13 inoculé au Na

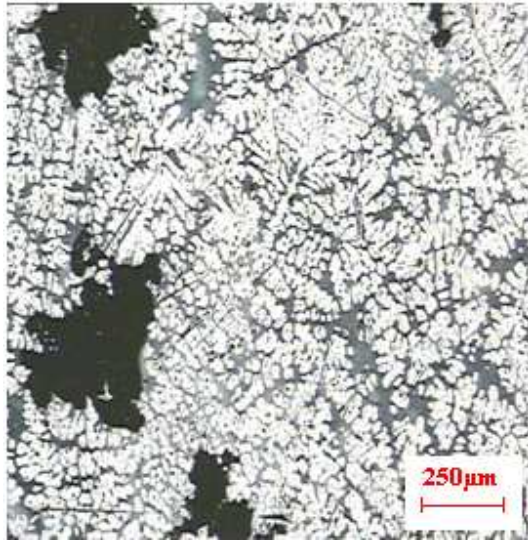


Fig.III.5 : AG35 non modifié

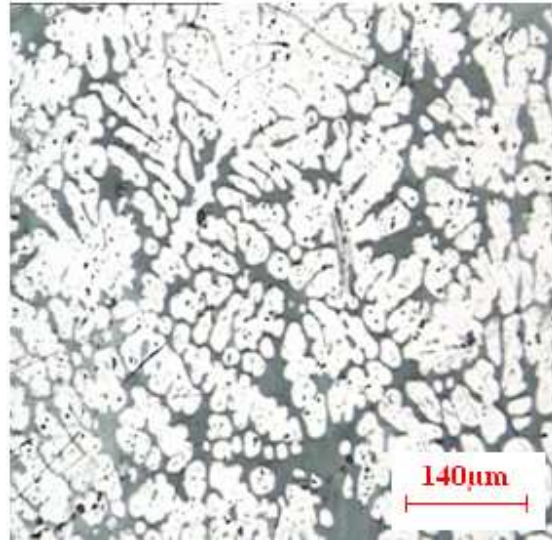


fig.III.6 : AG35 non modifié

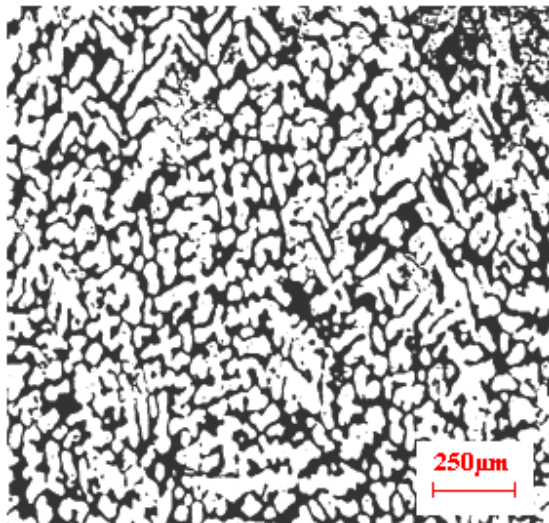


Fig.III.7: AG35 inoculé au Na

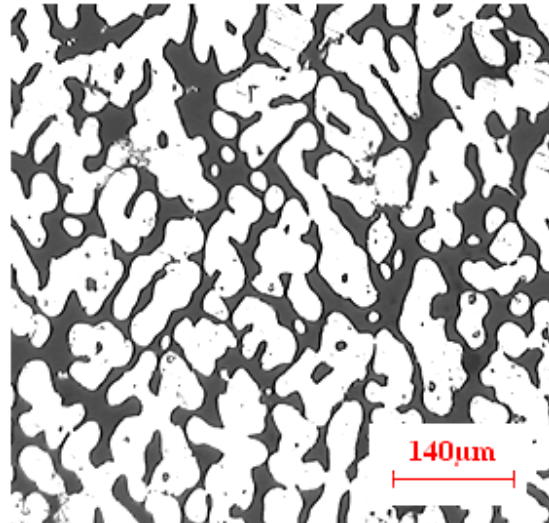


fig.III.8: AG35 inoculé au Na

III.2: Métallisation par l'acier inoxydable sur l'AS13 à la température ambiante.

La durée de la métallisation étant variable de 2 secondes à 14 secondes.

Les quatre métallographies des figures III.9, III.10, III.11 et III.12, illustrent l'interface du substrat et le dépôt d'acier inoxydable, ainsi que l'épaisseur de la couche métallisée, et mettent en évidence l'augmentation de l'épaisseur de l'interface en fonction du temps de maintien de la projection.

Les valeurs du tableau III.1 et la figure III.13 confirment cette évolution par une croissance de l'interface et de l'épaisseur de dépôt en fonction du temps de projection.

La figure III.14 met en évidence l'évolution de l'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d). $E_i = f(E_d)$ qui 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 de dépôt.
- les contraintes intrinsèques qui agissent fortement sur l'adhérence de dépôt provoquées par l'évolution de l'épaisseur de dépôt ($\Delta V/V$ augmente).
- Les contraintes thermiques sont générées essentiellement par la température du substrat qui est basse. Il existe une forte contraction thermique du dépôt chaud sur un substrat froid.
- Les contraintes structurales dû à la différence du réseau cristallin entre le dépôt cc et le substrat cfc.
- Les contraintes de trempe.



Fig.III.9:AS13-acier inox à l'ambiante. 6 sec

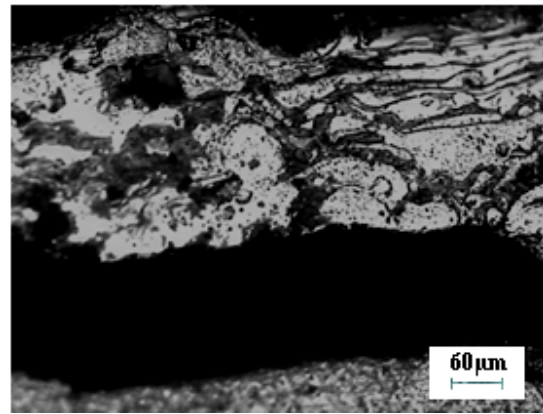


Fig.III.10:AS13-acier inox à l'ambiante 10 sec

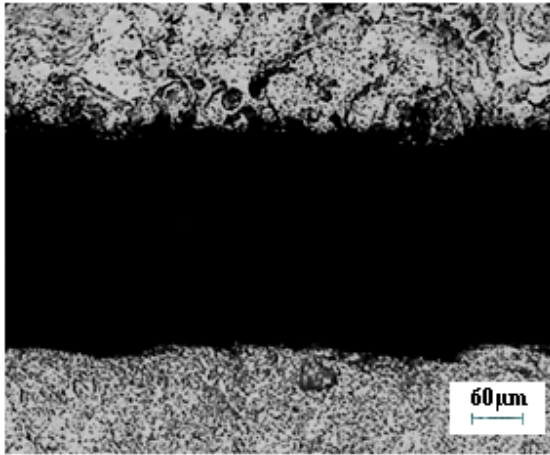


Fig.III.11:AS13-acier inox à l'ambiante 12sec



Fig.III.12:AS13-acier inox à l'ambiante 14 sec

Durée de projection (sec)	2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	60	110	135	160	220	340	520
Épaisseur de l'interface (μm)	9	40	42	55	148	306	602

Tableau.III.1. les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AS13-Acier inox) à la température ambiante.

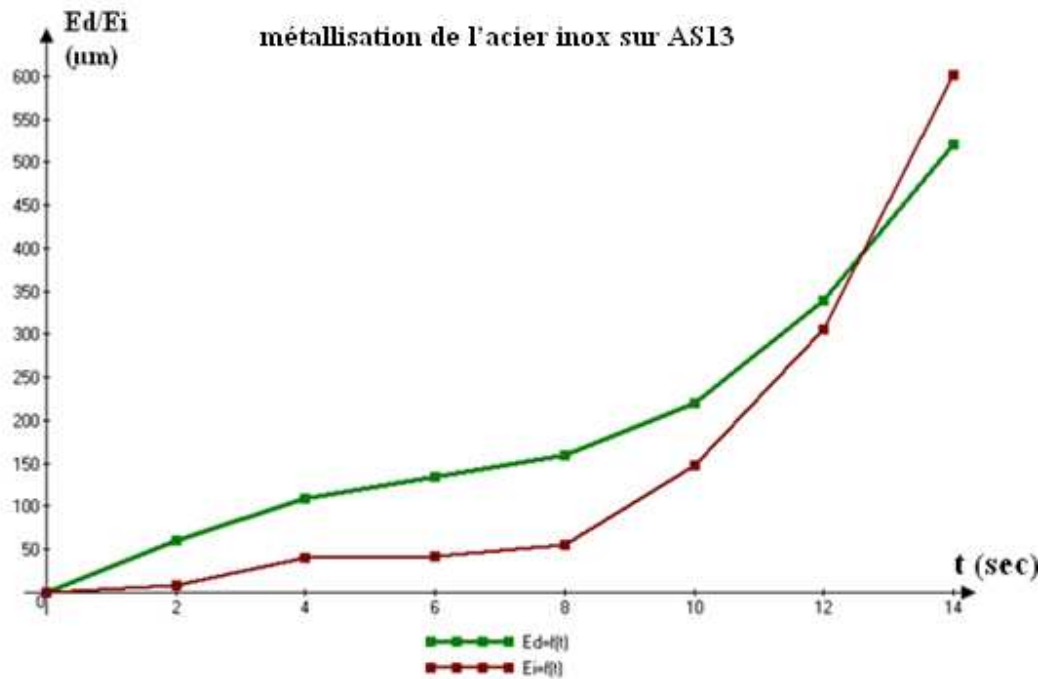


Fig.III.13 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps

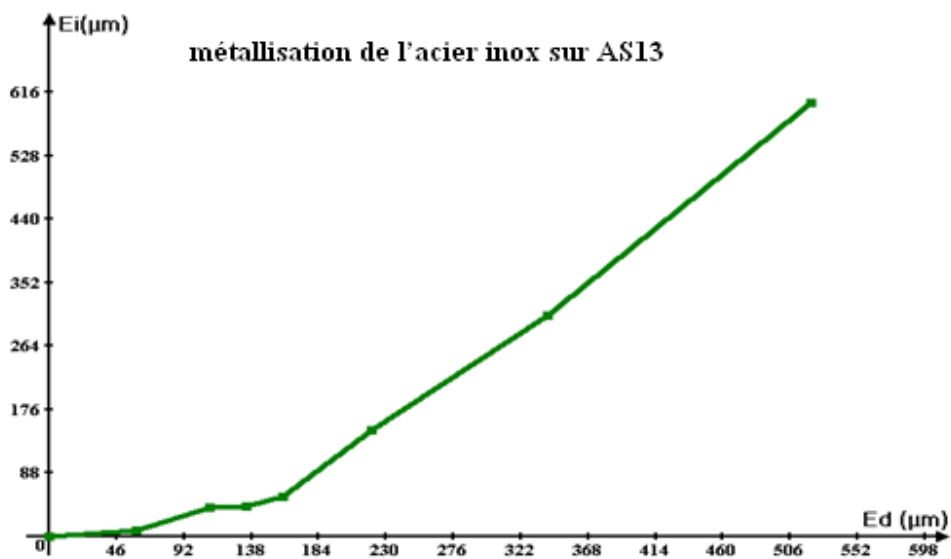


fig.III.14 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d).

III.3 : métallisation par l'acier inoxydable sur l'AS13 par préchauffage.

Le préchauffage de 200 °C environ a été effectué au chalumeau, et on constate selon les métallographies des figures III-15 , III-16 , III-17 , III-18 , que l'épaisseur de l'interface est réduite en fonction de la durée de projection et en fonction de l'épaisseur de dépôt .

Le tableau. III-2 et la figure III-19 confirment qualitativement de meilleurs résultats par rapport à la figure III-13.

Pour un dépôt de 500 μm , l'interface est à peine visible de l'ordre de 5 μm (figure III-20).

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

Cependant, la figure (III-18) montre qu'il y a un léger détachement entre le dépôt et le substrat, ce détachement est dû aux contraintes intrinsèques qui deviennent très importantes.

Le graphe de la figure (III-21) 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 pour des épaisseurs ne dépassent pas (210 μm). Ceci est dû, du 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.

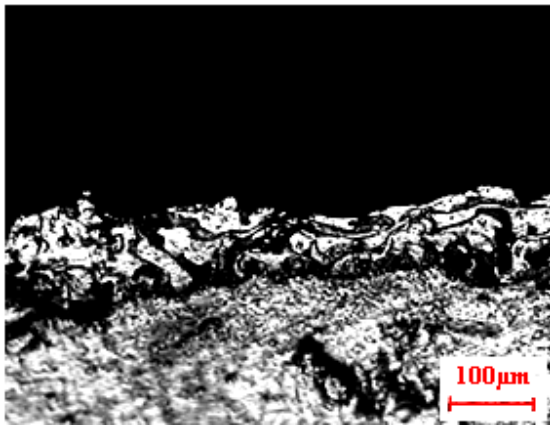


Fig.III-15: AS13-acier inox par préchauffage 4 sec

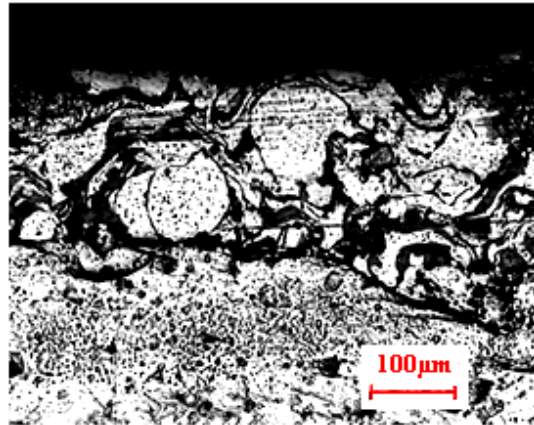


Fig.III-15: AS13-acier inox par préchauffage 8 sec

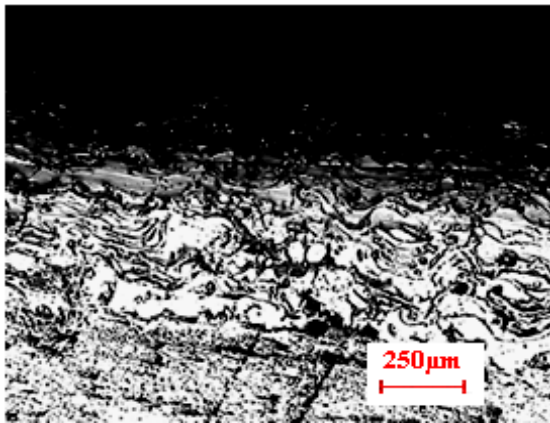


Fig.III-17: AS13-acier inox par préchauffage 12 sec

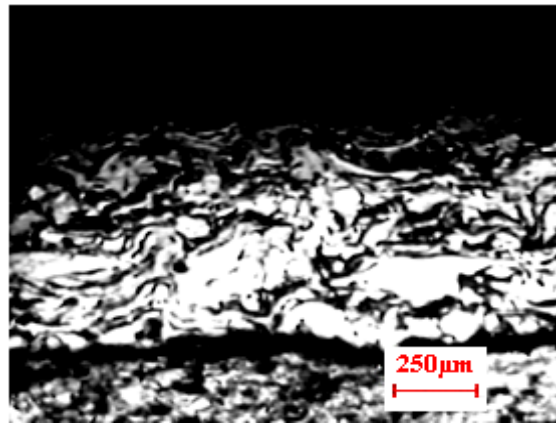


Fig.III-18: AS13-acier inox par préchauffage 14 sec

Durée de projection (sec)	2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	60	92	144	210	350	510	640
Épaisseur de l'interface (μm)	0	0	0	0	3	6	35

Tableau .III-2 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AS13-Acier inox) par préchauffage

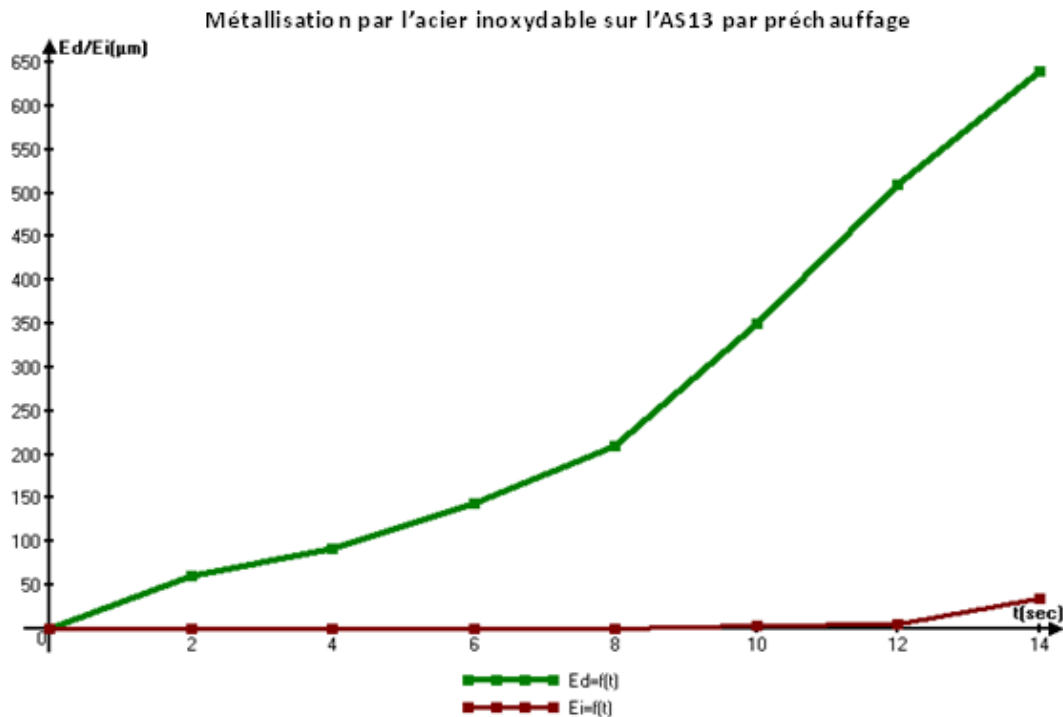


Fig .III-19 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur du dépôt (E_d) et de l'interface(E_i) en fonction du temps

La figure III-20 illustre la variation d' $E_i=f(E_d)$ et la figure III-21 illustre la comparaison d' $E_i=f(E_d)$ de la métallisation d'AS13-Acier inox à l'état ambiant et à l'état de préchauffage

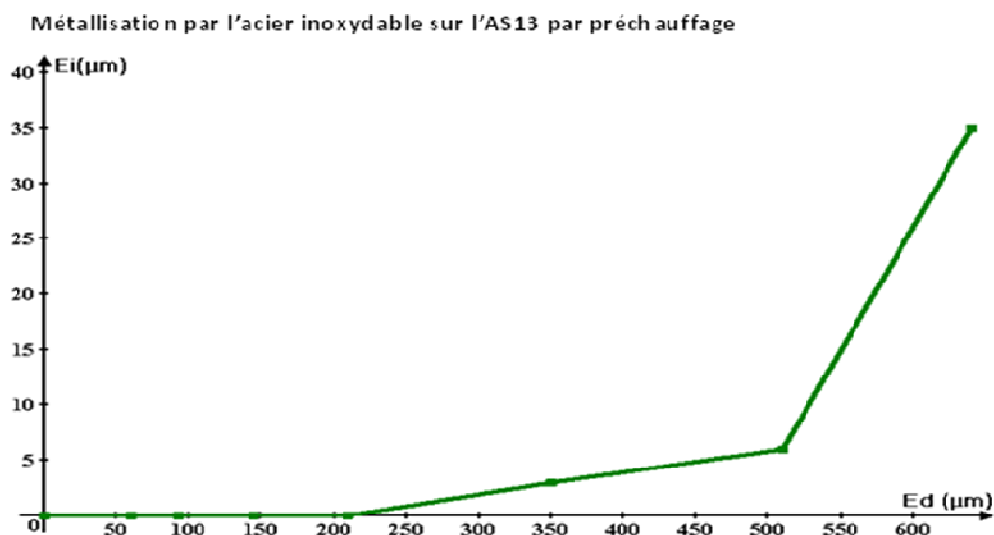


Fig .III-20 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur d'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur du dépôt (E_d).

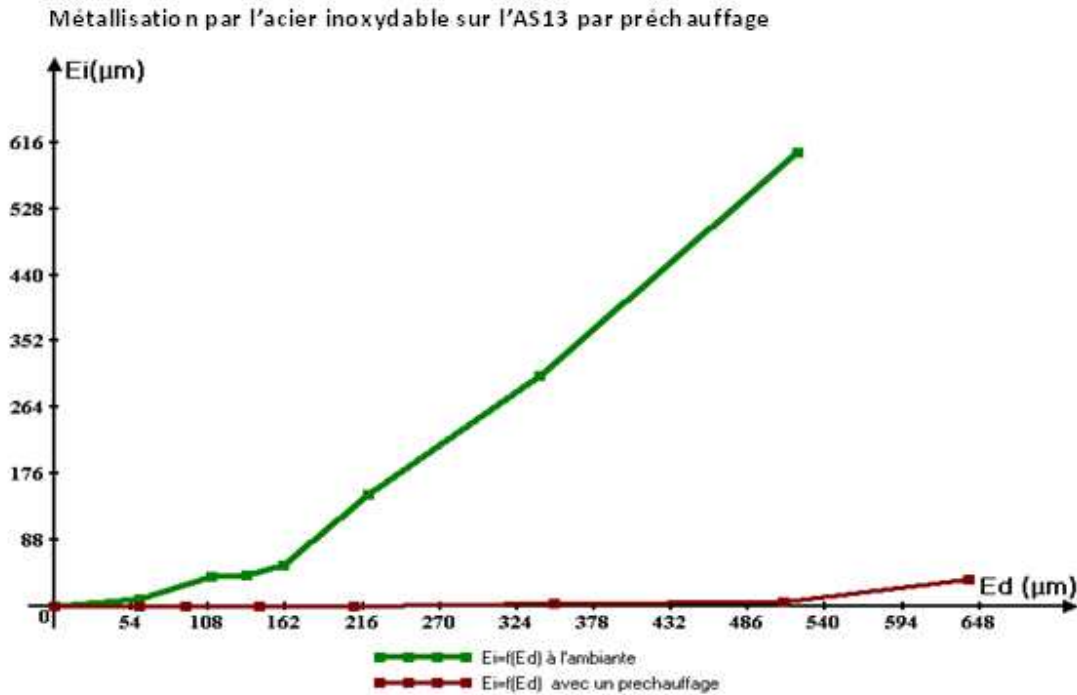


Fig. III-21: Graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (E_i), en fonction d'épaisseur de dépôt (E_d) à l'ambiante et avec préchauffage

III-4 : Métallisation par le molybdène sur l'AS13 à la température ambiante.

On constate pratiquement une bonne adhérence pour une durée de 14 secondes correspondant à une épaisseur de dépôt de 680 μm .

Les figures III-22 , III-23 , III-24 et III-25 illustrent qualitativement la qualité de l'accrochage de dépôt sur le substrat. Pour ce qui est dans le tableau III-3 confirme qualitativement et pratiquement l'inexistence de l'interface qui est également caractérisée par la figure III-27 ($E_d = f(E_i)$)

L'adhérence du molybdène sur l'alliage aluminium-silicium s'explique par les paramètres thermo-physiques du Mo et AS13. La température de fusion du Mo est très élevée (2623 °C) et la température de fusion de l'AS13 est légèrement basse (575 °C).

Ainsi, la projection des lamelles fondues va augmenter la température de contact. Cette température devient supérieure à la température de fusion du substrat et les particules s'incrudent dans le substrat et l'adhérence du dépôt devient acceptable.

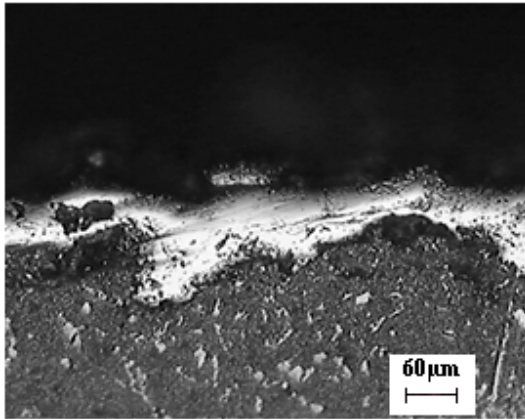


Fig.III-22: AS13-Mo à l'ambiante 2 sec

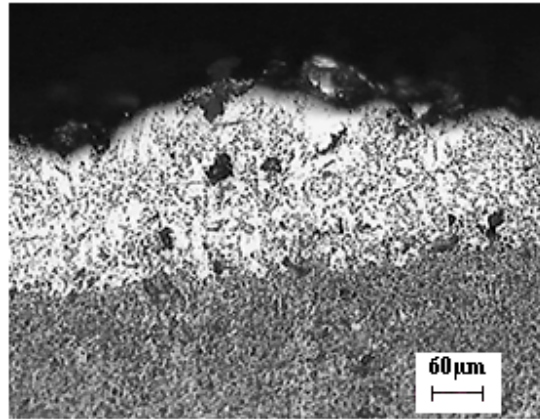


Fig.III-23: AS13-Mo à l'ambiante 6 sec

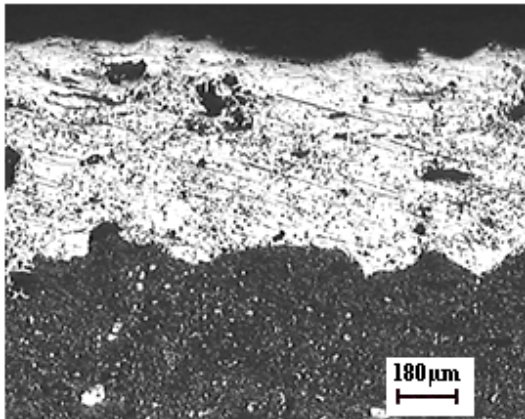


Fig.III-24: AS13-Mo à l'ambiante 12 sec

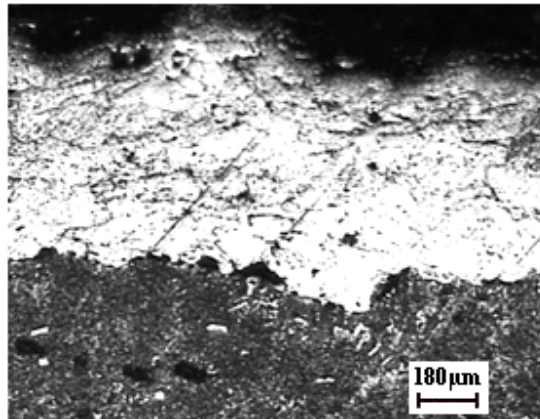


Fig.III-25: AS13-Mo à l'ambiante 14 sec

Durée de projection (sec)	de 2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	52	126	189	264	365	511	677
Épaisseur de l'interface (μm)	0	0	0	0	0	0	0

Tableau .III-3 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AS13-Mo) à la température ambiante

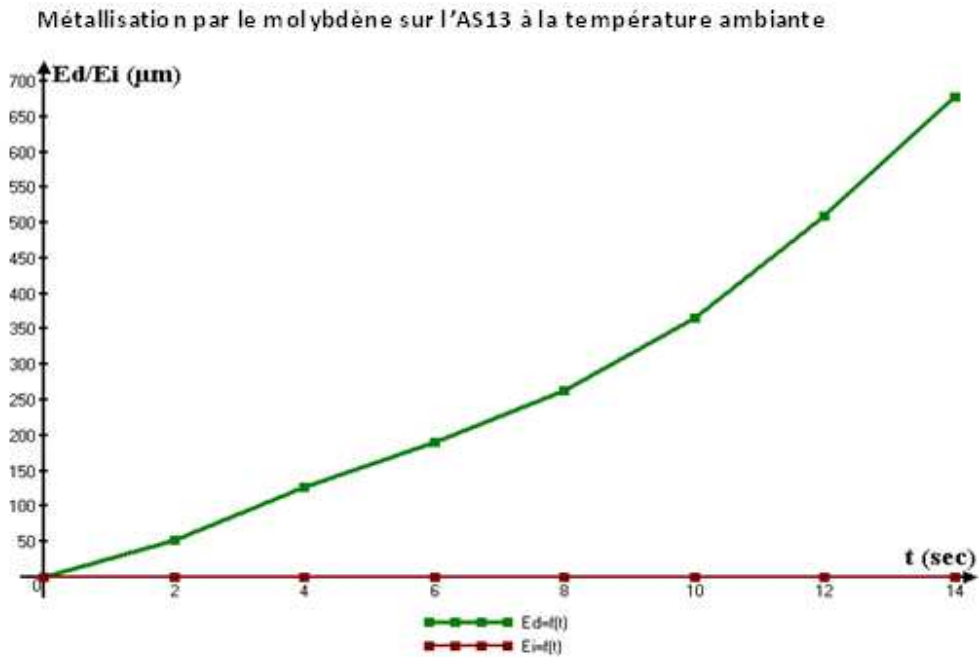


Fig. III-26 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps

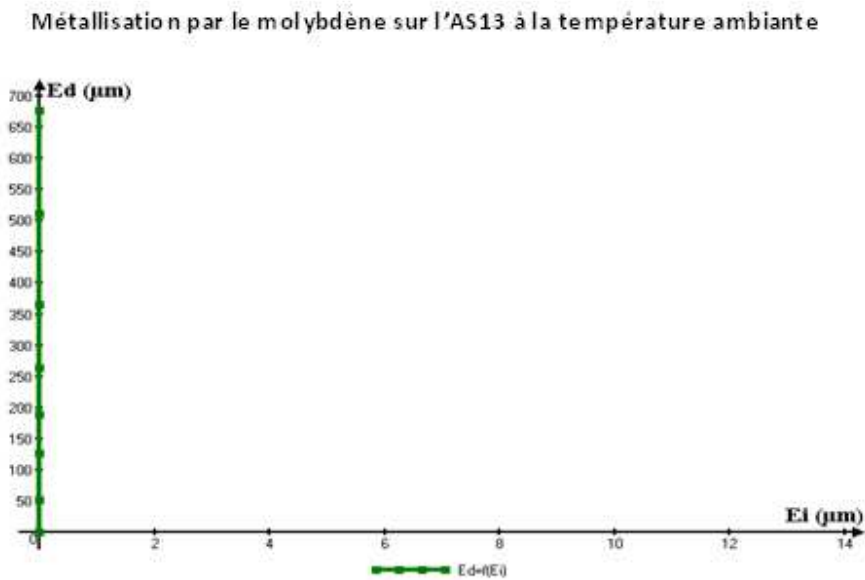


Fig. III-27 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) en fonction de l'épaisseur d'interface (E_i).

III-5 : métallisation par le molybdène sur l'AS13 par préchauffage

Le préchauffage a permis aussi d'éliminer l'interface pour toutes les valeurs des durées de projection correspondant aux épaisseurs de dépôt jusqu'à 662 μm .

Les figures III-28 , III-29 , III-30 et III-31 illustrent qualitativement la qualité de l'accrochage de dépôt sur le substrat.

Le tableau III-4 et les graphes des figures III-32 et III-33 confirment l'effet qualitatif de ce dépôt. Lors de la projection des lamelles fondues, la température de contact favorisée par le préchauffage devient supérieure à la température de fusion du substrat si bien que les particules s'incrudent dans le substrat et l'adhérence du dépôt est très bonne

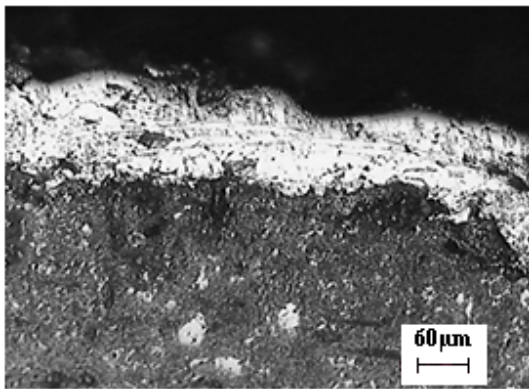


Fig.III-28: AS13- Mo par préchauffage 4 sec

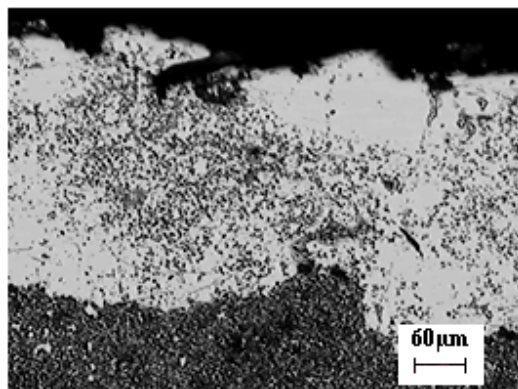


Fig.III-29: AS13- Mo par préchauffage 8 sec

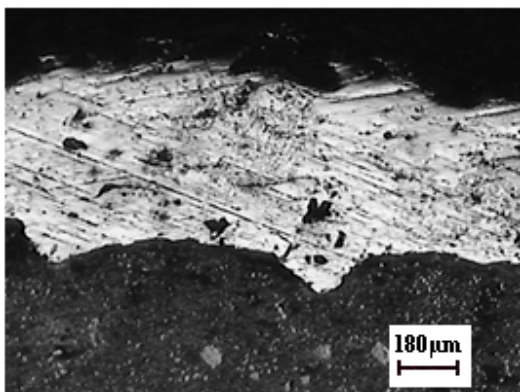


Fig.III-30: AS13- Mo par préchauffage 12 sec

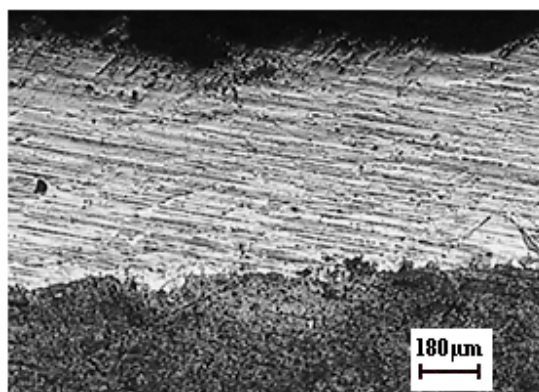


Fig.III-31: AS13- Mo par préchauffage 14 sec

Durée de projection (sec)	2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	67	110	173	260	405	538	662
Épaisseur de l'interface (μm)	0	0	0	0	0	0	0

Tableau .III-4 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AS13-Mo) par préchauffage

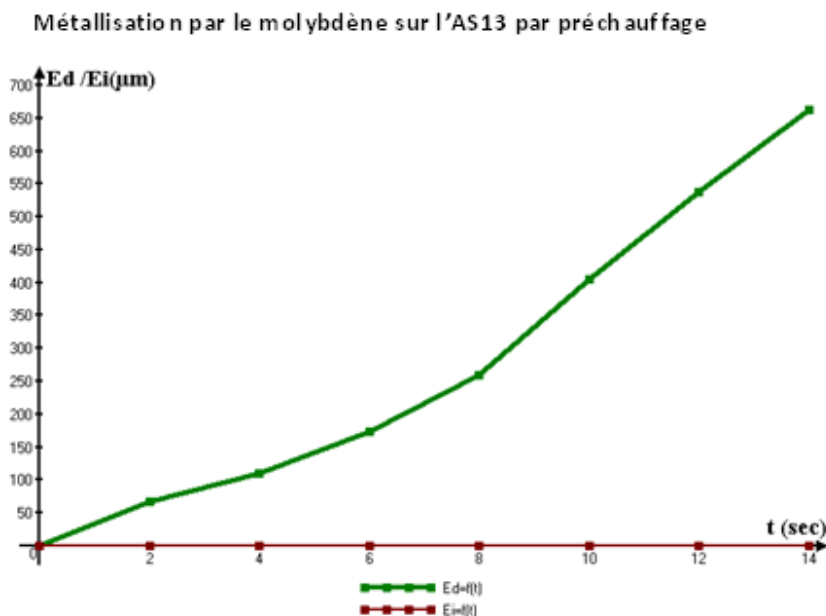


Fig. III-32 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps.

La figure III-33 illustre la variation d' $E_d=f(E_i)$ et la figure III-34 illustre la comparaison d' $E_i=f(E_d)$ de la métallisation d'AS13-Acier inox à l'état ambiant et à l'état de préchauffage

Métallisation par le molybdène sur l'AS13 par préchauffage

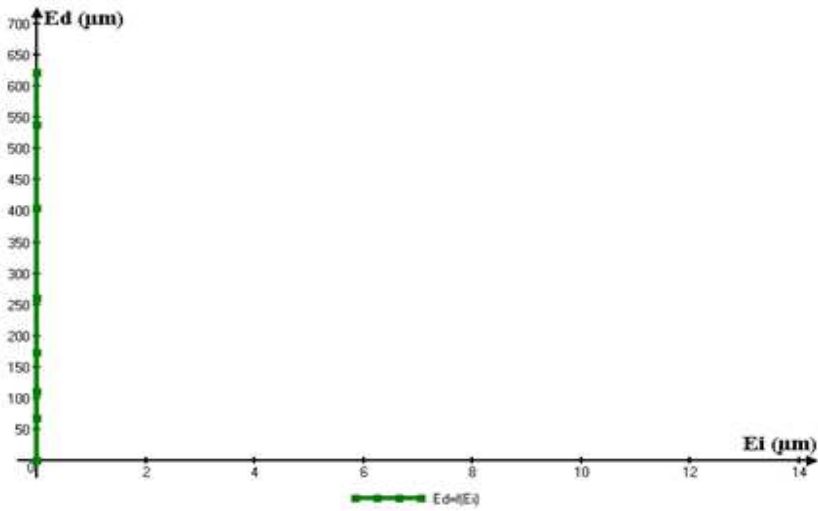


Fig. III-33 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) en fonction de l'épaisseur d'interface (E_i).

Dans le cas d'une température de contact supérieure à la température de fusion du substrat les particules s'incruste dans le substrat et l'adhérence du dépôt est très bonne [6].

Métallisation par le molybdène sur l'AS13 par préchauffage

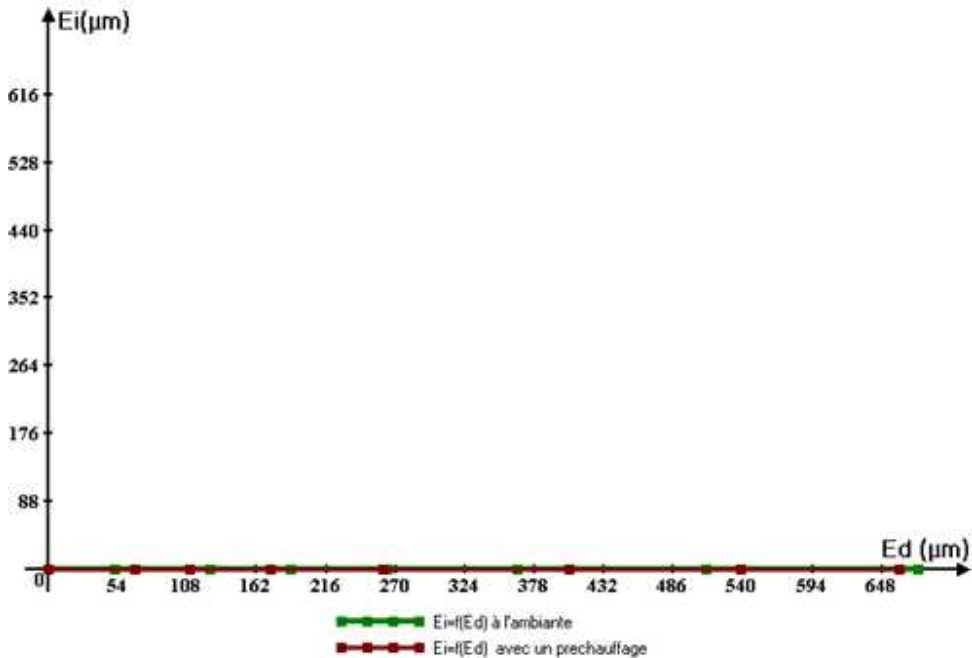


Fig. III-34 : Graphe représente l'évolution de l'épaisseur (E_i) de l'interface en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d) à l'ambiante et avec un préchauffage.

III.6: Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 à la température ambiante.

L'adhérence est pratiquement excellente pour une durée de projection de 8 secondes, correspondant à 308 μm d'épaisseur de dépôt.

Mais au delà, on constate l'apparition de l'interface qui ne cesse d'augmenter jusqu'à une valeur de 94 μm correspondant à une 14 secondes de projection.

Les métallographies des figures III-35 , III-36 , III-37 et III-38 , aussi que les graphes III-39 et III-40 et le tableau III-5 mettent en évidence cette caractéristique.

Ceci peut s'explique par la bonne énergie d'adhésion du dépôt sur le substrat qui est liée directement à l'énergie de surface de substrat et l'énergie des espèces constituants le dépôt.

Cependant, pour une épaisseur supérieure à 308 μm (fig. III-37 et III-38), le dépôt se détache du substrat, et cela est dû aux contraintes intrinsèques qui agissent fortement sur l'adhérence du dépôt.

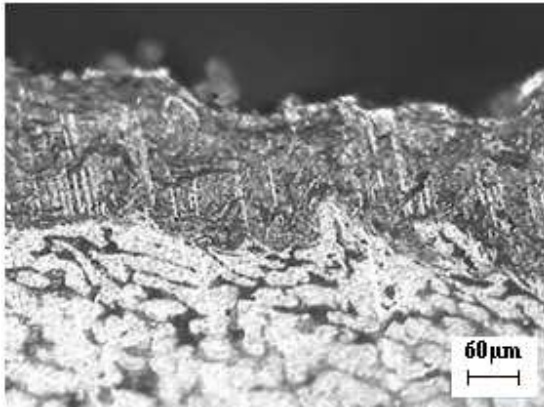


Fig.III-35:AG35-acier inox à l'ambiante 4 sec

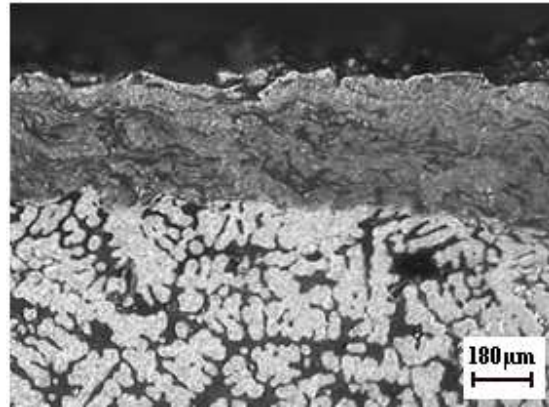


fig.III-36: AG35-acier inox à l'ambiante 8 sec

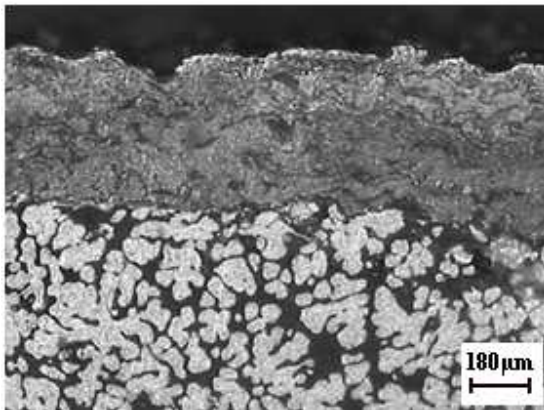


Fig.III-37: AG35 -acier inox à l'ambiante 10 sec

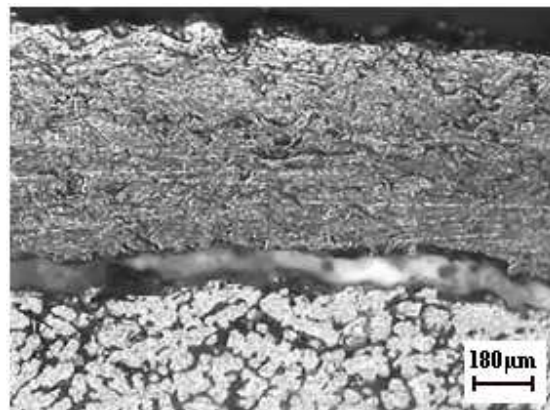


fig.III-38: AG35-acier inox à l'ambiante 14 sec

Durée de projection (sec)	2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	62	140	215	308	421	512	608
Épaisseur de l'interface (μm)	0	0	0	0	13	28	94

Tableau .III-5 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AG35-Acier inox) à la température ambiante.

Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 à la température ambiante

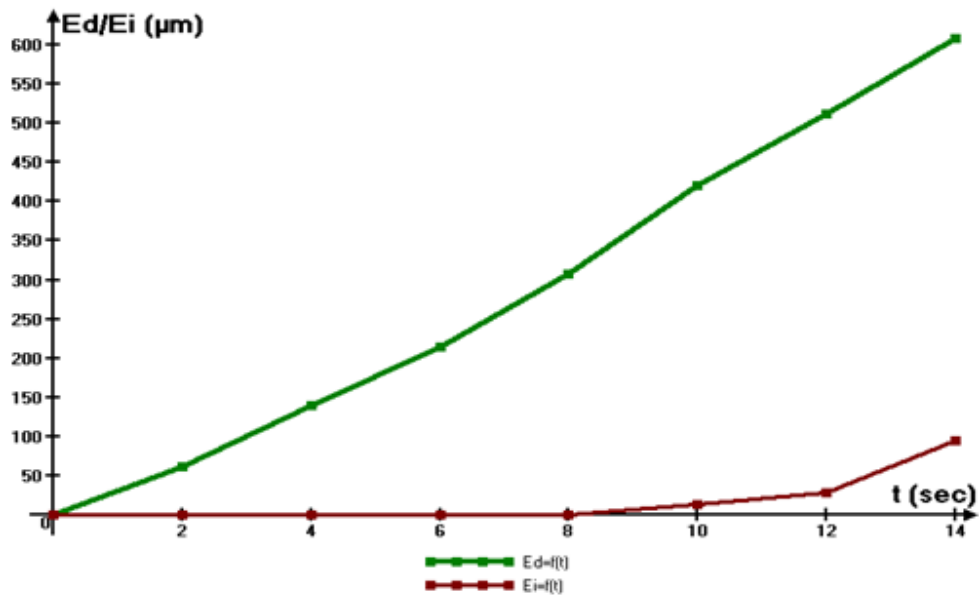


Fig. III-39 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps

Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 à la température ambiante

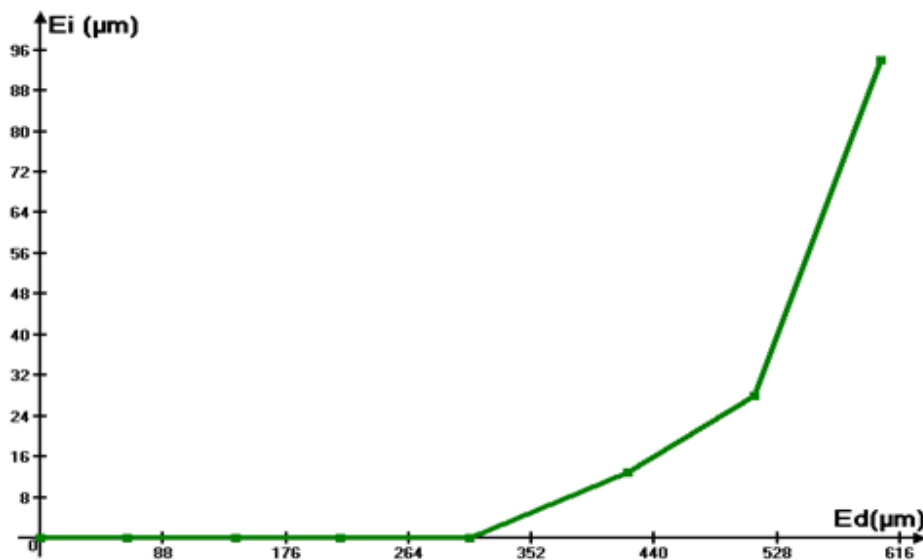


Fig. III-40 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d).

III.7: Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 par préchauffage.

Le début de l'appariation de l'interface apparaît pratiquement à 12 secondes de projection correspondant à une épaisseur de dépôt de 339 μm , mieux que dans le cas de la température ambiante.

L'ensemble des métallographies des figures III-41 , III-42 , III-43 et III-44 , ainsi que le tableau III-6 et les graphes des figures III-45 et III-46 illustrent cette caractéristique.

Ceci est dû à une bonne énergie d'adhésion des espèces constituant le dépôt sur le substrat.

Cependant, pour une épaisseur supérieure à 339 μm , on constate qu'il y a un détachement entre le substrat et le dépôt, mais il est mieux que la projection à l'ambiante (figure III-47). Cela est dû aux contraintes intrinsèques qui agissent fortement sur l'adhérence de dépôt, alors que les contraintes thermiques sont réduites.

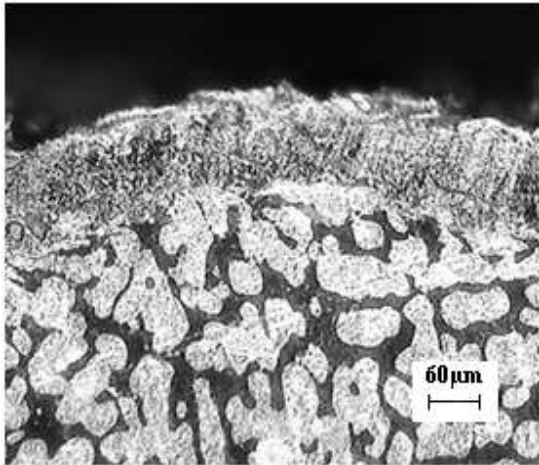


Fig. III-41: AG35-acier inox par préchauffage 4 sec

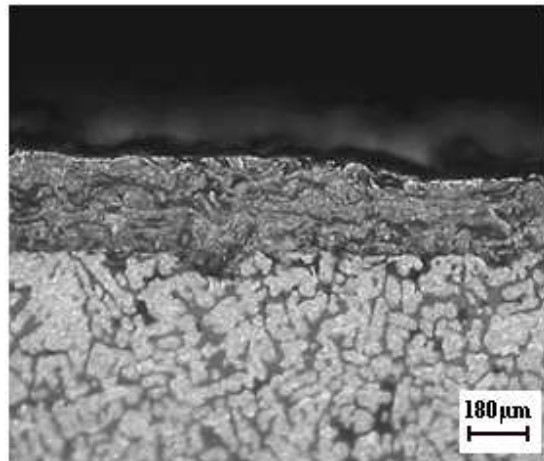


fig.III-42: AG35-acier inox par préchauffage 8 sec

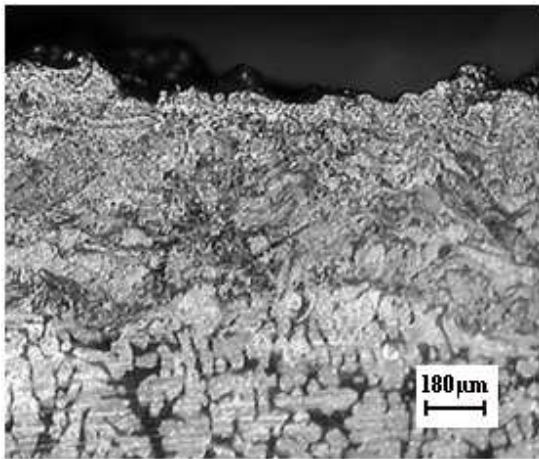


Fig.III-43: AG35-acier inox par préchauffage 12 sec

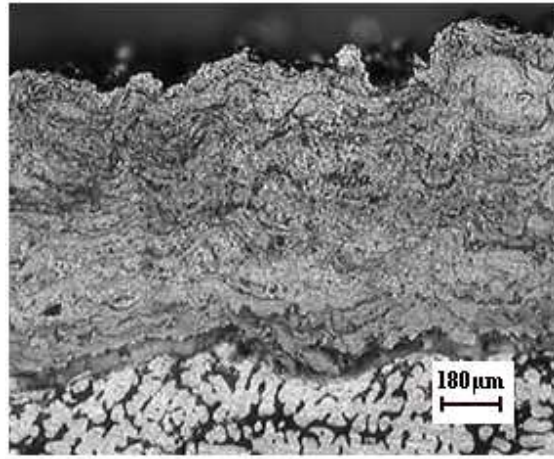


fig.III-44: AG35-acier inox par préchauffage 14 sec

Durée de projection (sec)	2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	55	101	160	244	339	480	620
Épaisseur de l'interface (μm)	0	0	0	0	0	10	51

Tableau .III-6 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AG35-Acier inox) par préchauffage

Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 par préchauffage

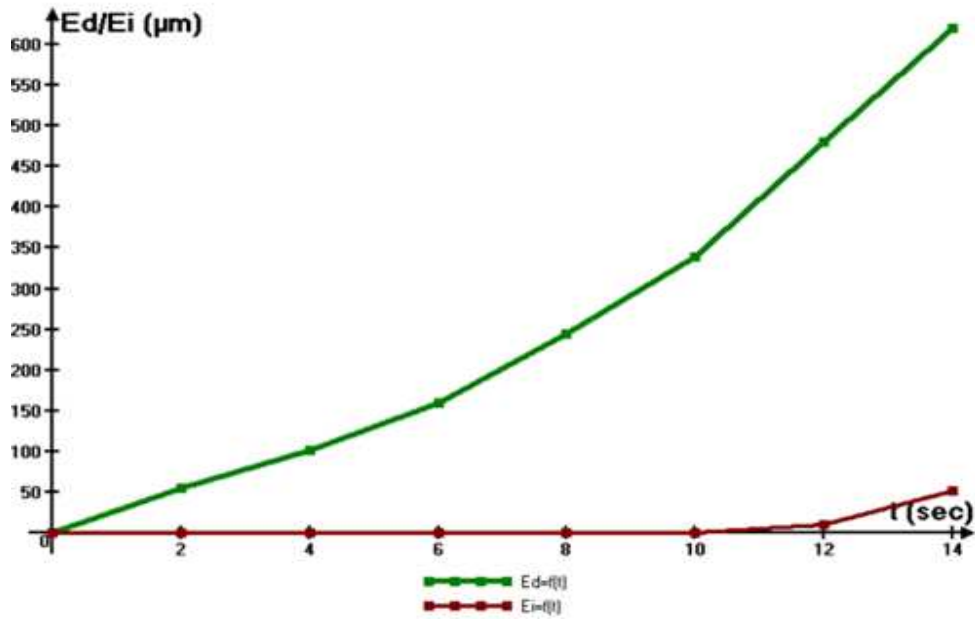


Fig. III-45 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps

La figure III-46 illustre la variation d' $E_i=f(E_d)$ et la figure III-47 illustre la comparaison d' $E_i=f(E_d)$ de la métallisation d'AS13-Acier inox à l'état ambiant et à l'état de préchauffage

Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 par préchauffage

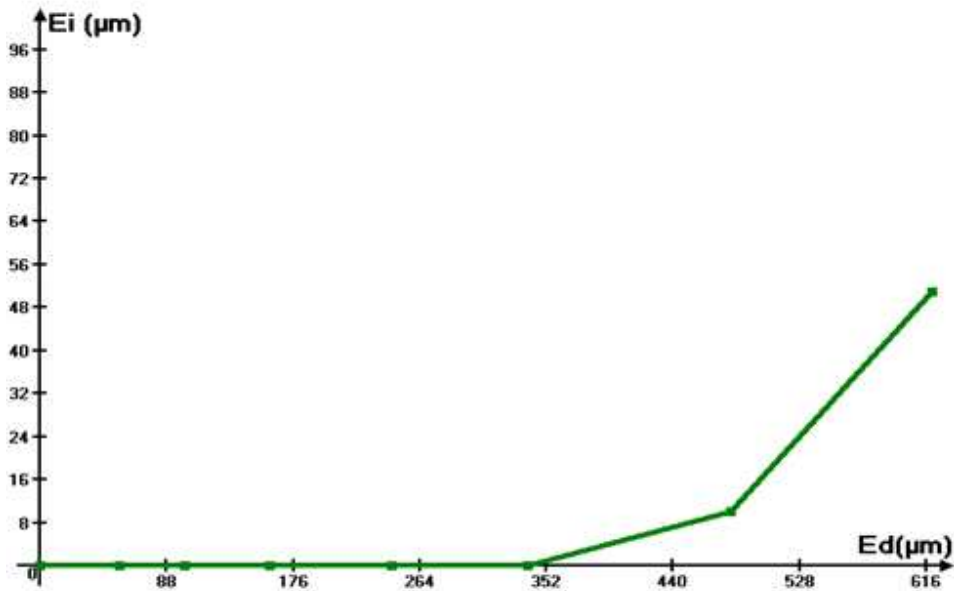


Fig. III-46 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur d'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d).

Métallisation par l'acier inoxydable sur l'alliage AG35 par préchauffage

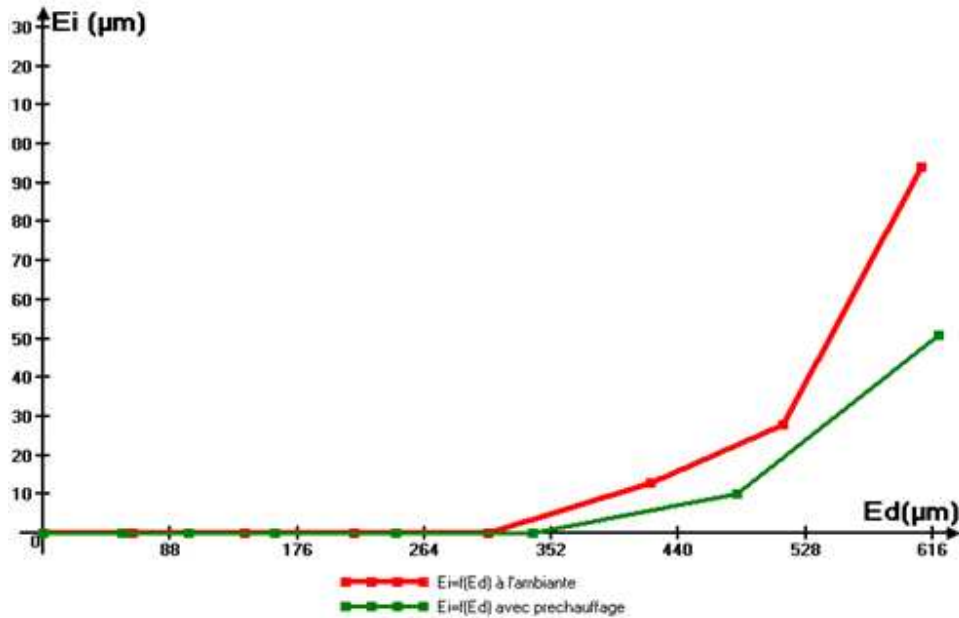


Fig. III-47 : Graphe représente l'évolution de l'épaisseur d'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d) à l'ambiante et avec préchauffage

III-8 : Métallisation par le molybdène sur l'alliage AG35 à la température ambiante.

L'alliage Al-Mg n'est pas apte à la métallisation au molybdène à la température ambiante, même pour une durée de projection de 1,5 secondes.

La présence de l'interface à toutes les durées de projection caractérise la médiocrité de cette adhérence selon le tableaux III-7, les métallographies des figures III-48 , III-49 , III-50 , III-51 et les graphes des figures III-52 et III-53 confirment cela.

Malgré que la température de fusion de cet alliage est basse ($550\text{ }^{\circ}\text{C}$) et la température de dépôt (molybdène) est élevée, on constate la médiocrité cette adhérence.

Ceci est dû à une faible énergie d'adhésion de dépôt sur le substrat qui liée directement à l'énergie de surface du substrat et à l'énergie de surface des constituants du dépôt. Ainsi, les contraintes thermiques agissent fortement sur l'adhérence de dépôt sur le substrat à cause d'une grande différence entre le coefficient de dilatation thermique de dépôt ($\alpha = 5\text{ }10^{-6}\text{K}^{-1}$) et le coefficient de dilatation thermique du substrat ($\alpha = 25\text{ }10^{-6}\text{K}^{-1}$).

A ces contraintes s'ajoutent les contraintes intrinsèques qui agissent lors de l'évolution de l'épaisseur de dépôt.

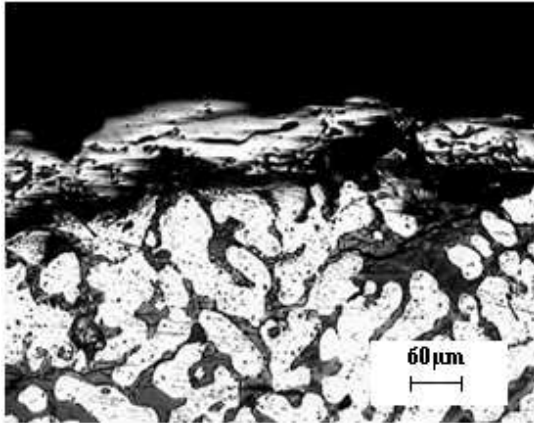


Fig.III-48: AG35-Mo à l'ambiante 3 sec

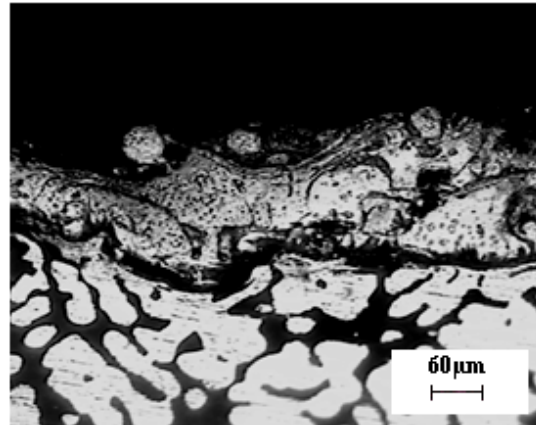


fig. III-49: AG35-Mo à l'ambiante 4.5 sec

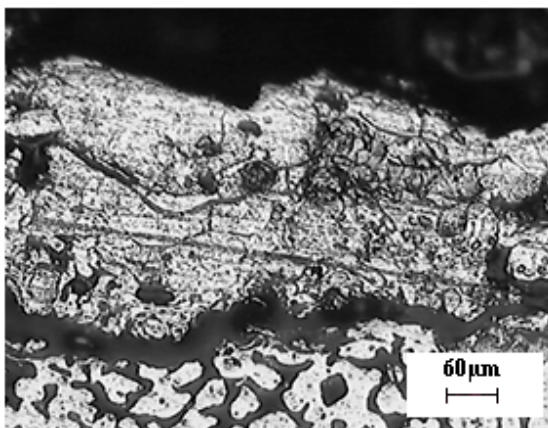


Fig. III-50: AG35-Mo à l'ambiante 7.5 sec

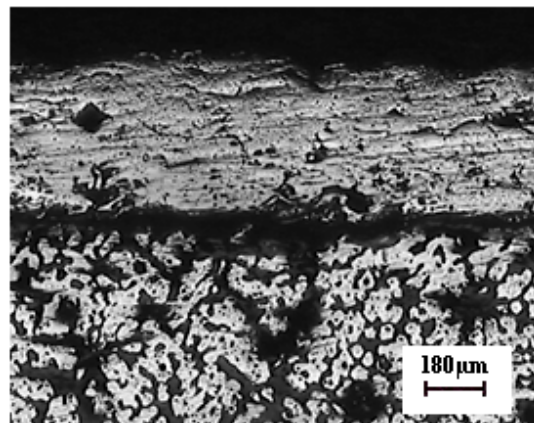


fig.III-51: AG35-Mo à l'ambiante 10.5 sec

Durée de projection (sec)	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5
Épaisseur de dépôt (μm)	46	78	135	222	317	381	462
Épaisseur de l'interface (μm)	12	12	16	28	32	60	79

Tableau .III-7 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AG35-acier inox) à la température ambiante.

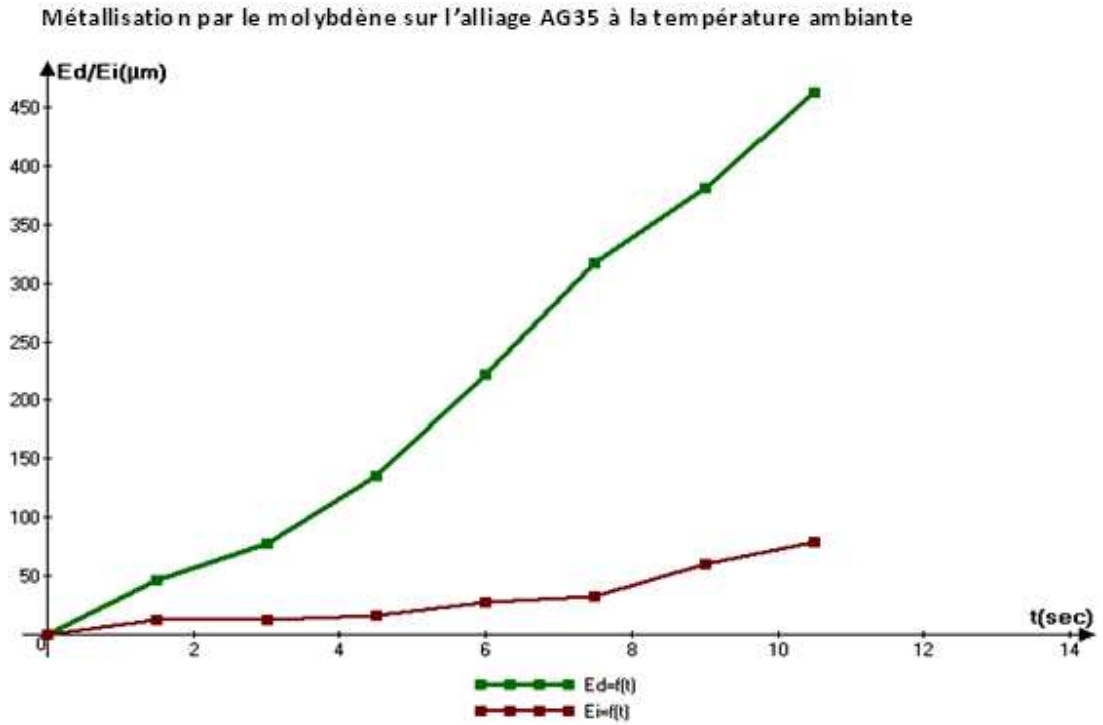


Fig. III-52 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps



Fig. III-53 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d).

III-9 : Métallisation par le molybdène sur l'alliage AG35 par préchauffage.

Le préchauffage n'apporte aucune amélioration à cette médiocrité est dû à l'inadaptation de l'alliage Al-Mg à la métallisation au molybdène, contrairement à la métallisation à l'acier inoxydable qui avait montré des qualités meilleures.

Les micrographies des figures III-54 , III-55 , III-56 et III-57, ainsi de la tableau III-8 et les graphes des figures III-58 et III-59 mettent en en évidence cette défaillance.

Le fait que les coefficients de dilatation thermique du dépôt et du substrat sont différents, le préchauffage du substrat ne présente aucune amélioration.

D'après le graphe de la figure III-60 on constate que jusqu'à 110 μm , ne présente pas de différence entre un échantillon préchauffé et un échantillon non préchauffé. Mais pour une épaisseur de dépôt comprise entre 110 et 360 μm , l'épaisseur de l'interface d'un dépôt projeté à une température ambiante est meilleure que celui projeté avec préchauffage.

Cependant, pour une épaisseur de dépôt supérieur à 360 μm l'épaisseur de l'interface d'un dépôt projeté avec un préchauffage meilleure que celui projeté à la température ambiante.

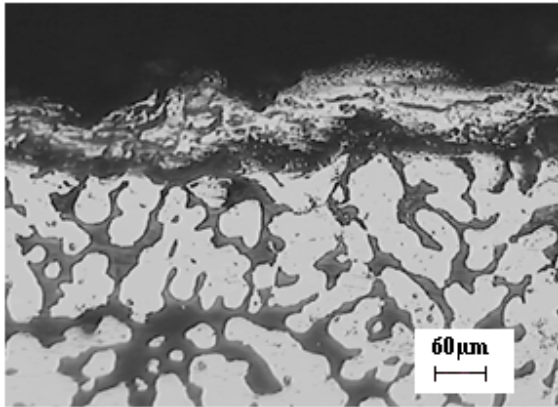


Fig. III-54: AG35- Mo par préchauffage 2 sec

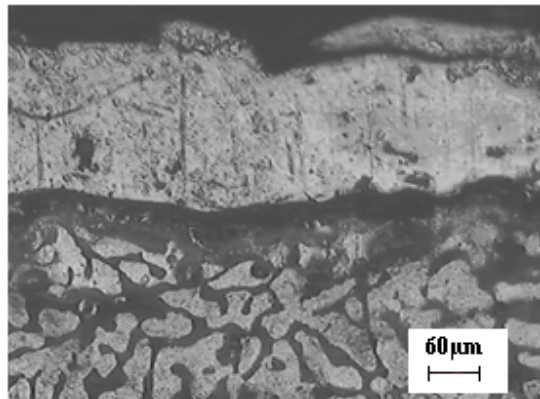


fig.III-55: AG35- Mo par préchauffage 6 sec

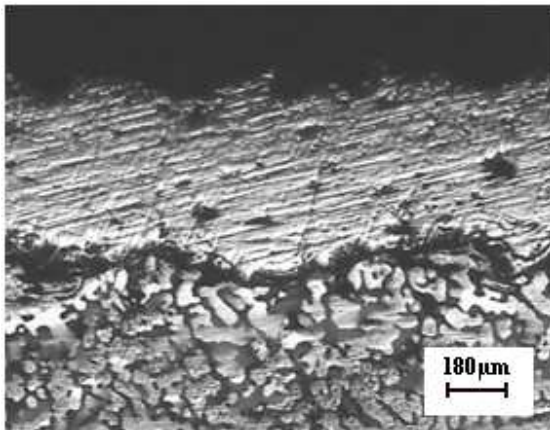


Fig.III-56: AG35- Mo par préchauffage 10 sec

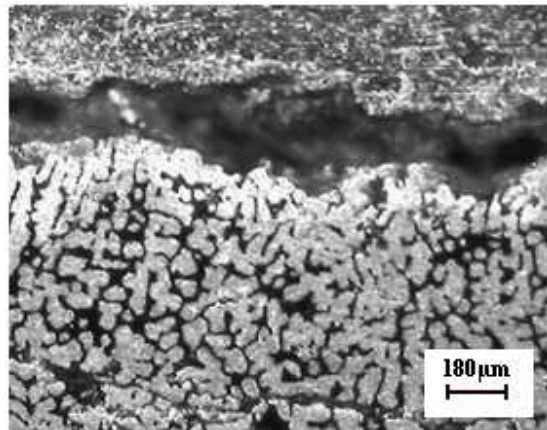


fig.III-57: - Mo par préchauffage 14 sec

Durée de projection (sec)	2	4	6	8	10	12	14
Épaisseur de dépôt (μm)	62	114	180	250	365	469	630
Épaisseur de l'interface (μm)	18	19	28	40	51	64	115

Tableau .III-8 : les valeurs de l'épaisseur du dépôt et de l'interface correspondant aux durées de projection (AG35-Acier inox) par préchauffage

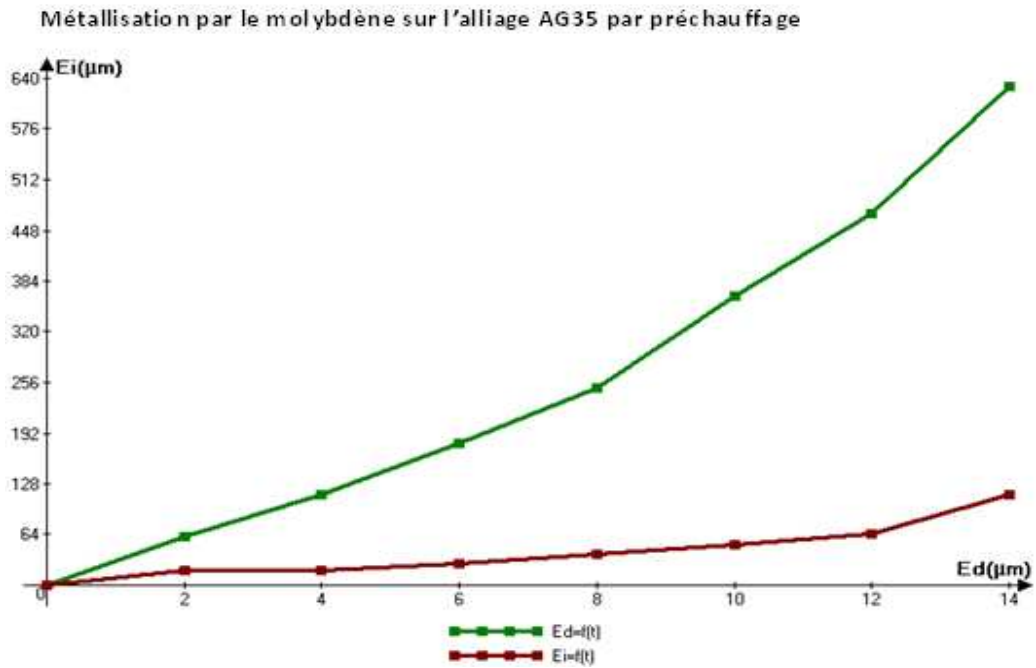


Fig. III-58 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de dépôt (E_d) et de l'interface (E_i) en fonction du temps

La figure III-59 illustre la variation d' $E_i=f(E_d)$ et la figure III-60 illustre la comparaison d' $E_i=f(E_d)$ de la métallisation d'AS13-Acier inox à l'état ambiant et à l'état de préchauffage

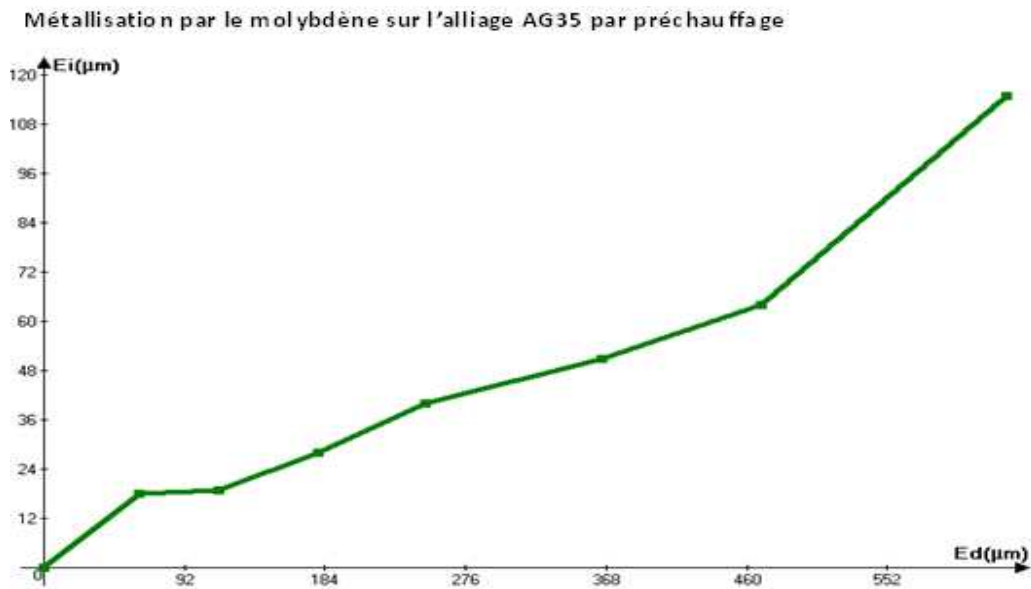


Fig. III-59 : graphe représente l'évolution de l'épaisseur de l'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt

Métallisation par le molybdène sur l'alliage AG35 par préchauffage

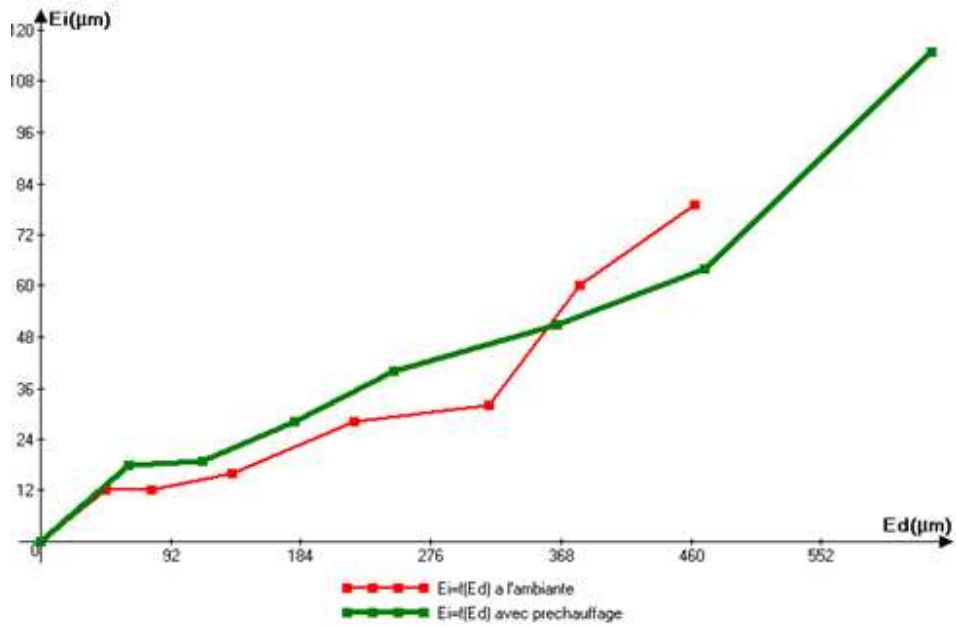


Fig. III-60 : Graphe représente l'évolution de l'épaisseur d'interface (E_i) en fonction de l'épaisseur de dépôt (E_d) à l'ambiante et avec préchauffage

Le tableau III-9 récapitule et résume l'ensemble des résultats et on remarque que l'alliage AS13 est le plus apte à être accepter la métallisation et en particulier celle du molybdène.

L'alliage AG35 est moins apte à subir la métallisation et en particulier celle du molybdène.

substrat	dépôt	température	Optimisation de la durée limite de projection	Épaisseur de dépôt
AS13	Acier inox	ambiante	—	—
		préchauffage	8 secondes	210 µm
	Molybdène	Ambiante	14 secondes	677µm
		Préchauffage	14 secondes	662 µm
Al-Mg	Acier inox	Ambiante	8 secondes	308 µm
		Préchauffage	10 secondes	339µm
	Molybdène	Ambiante	—	—
		Préchauffage	—	—

Tableau III-9 : récapitulatif des valeurs des durées de projection optimisées relatif à l'épaisseur d'interface zéro correspondant au dépôt métallisé

Conclusion

Le bilan de l'étude nous mène à tirer des conclusions à travers le tableau III-9.

On constate effectivement, que l'alliage d'aluminium le plus apte à être métallisé est l'AS13, ainsi que le matériau à projeter le plus apte est le molybdène à la température ambiante ou au préchauffage.

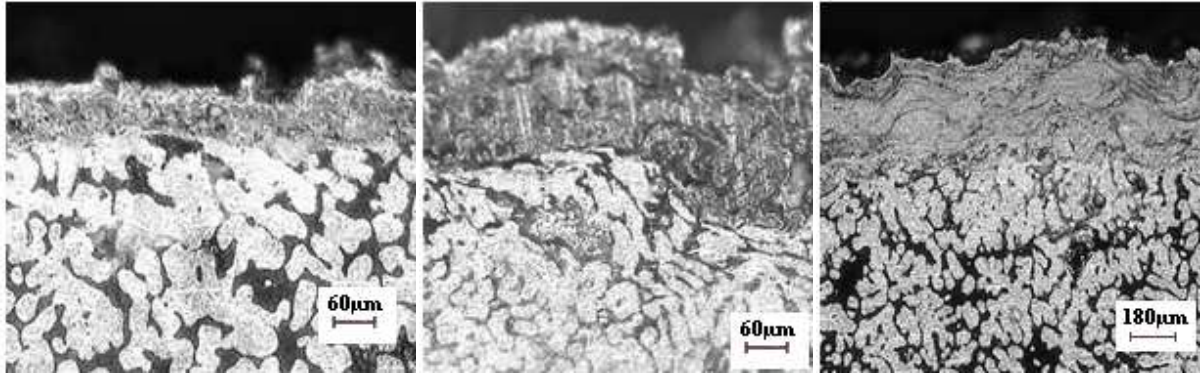
Le substrat AG35 présente des résultats exploitables à 8 secondes et 10 secondes correspondant aux épaisseurs de dépôt de l'acier inoxydable 308 μm et 339 μm .

Nous préconisons comme perspectives:

- Des tests d'arrachements.
- De prolonger les durées de projection du molybdène sur le substrat AS13.
- De métalliser sur les substrats d'alliages d'aluminium après dégazage aux différentes températures à l'état solide

Annexe

La projection de l'acier inox sur AG35 avec un préchauffage

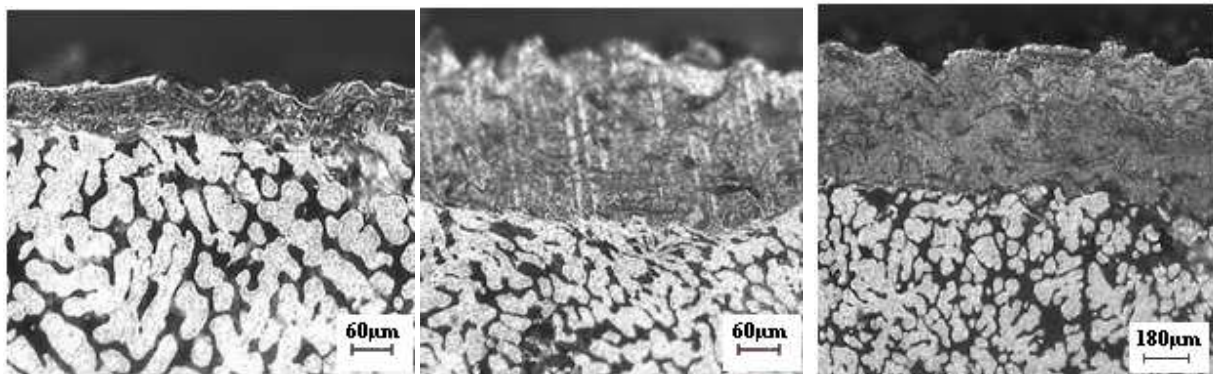


AG35 2 sec

AG35 6 sec

AG35 10 sec

La projection de l'acier inox sur AG35 à l'ambiante

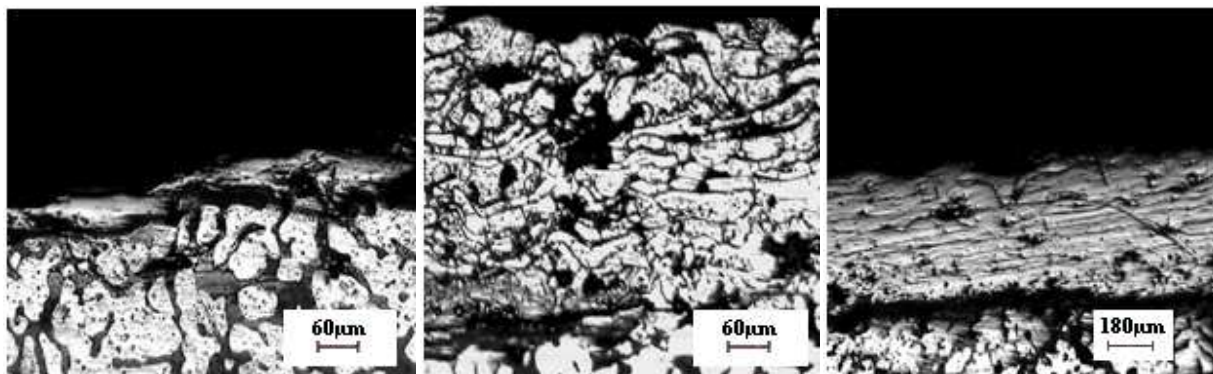


AG35 2 sec

AG35 6 sec

AG35 12 sec

La projection du molybdène sur AG35 à l'ambiante

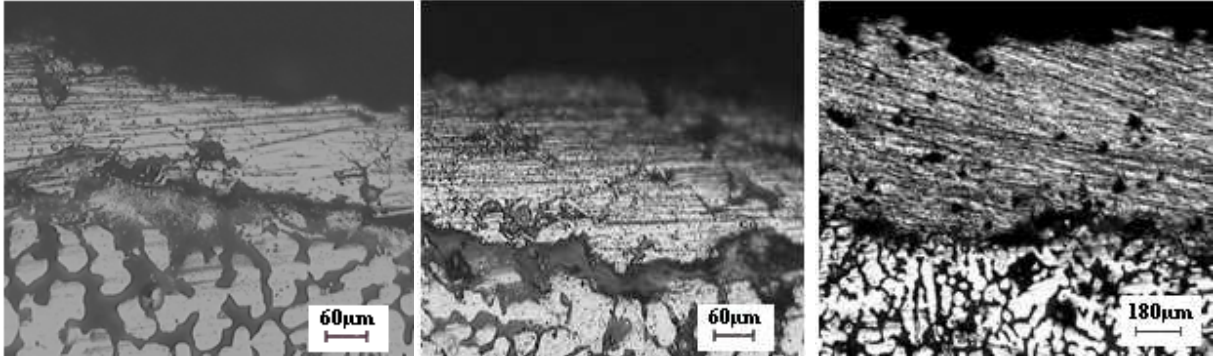


AG35 1.5 sec

AG35 7.5 sec

AG35 9 sec

La projection du molybdène sur AG35 avec préchauffage

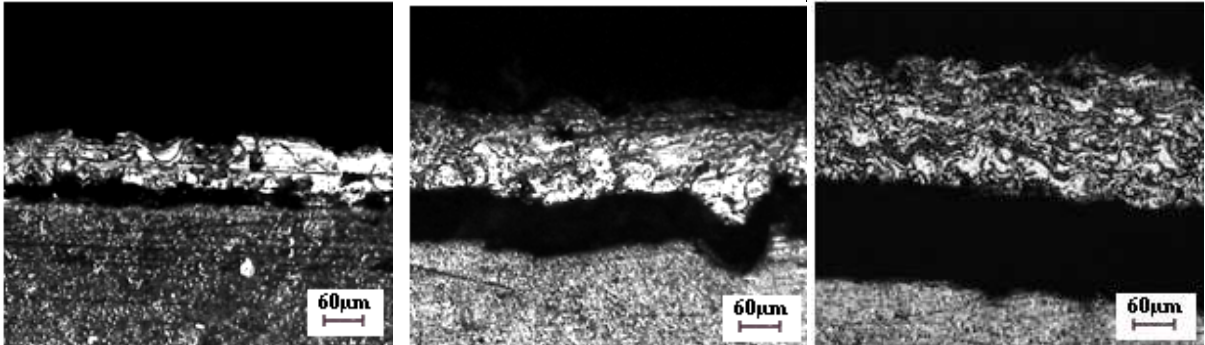


AG35 4 sec

AG35 8 sec

AG35 12 sec

La projection de l'acier inox sur AS13 à l'ambiante

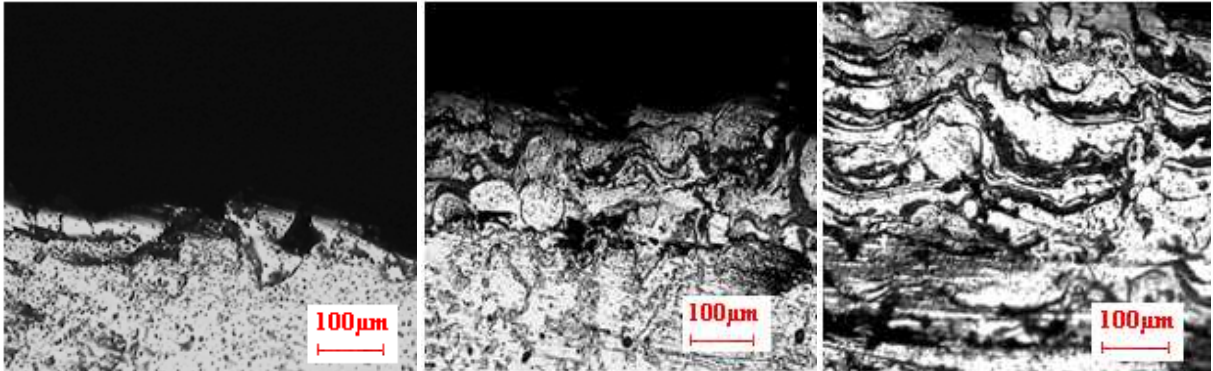


AS13 2 sec

AS13 4 sec

AS13 8 sec

La projection de l'acier inox sur AS13 avec préchauffage



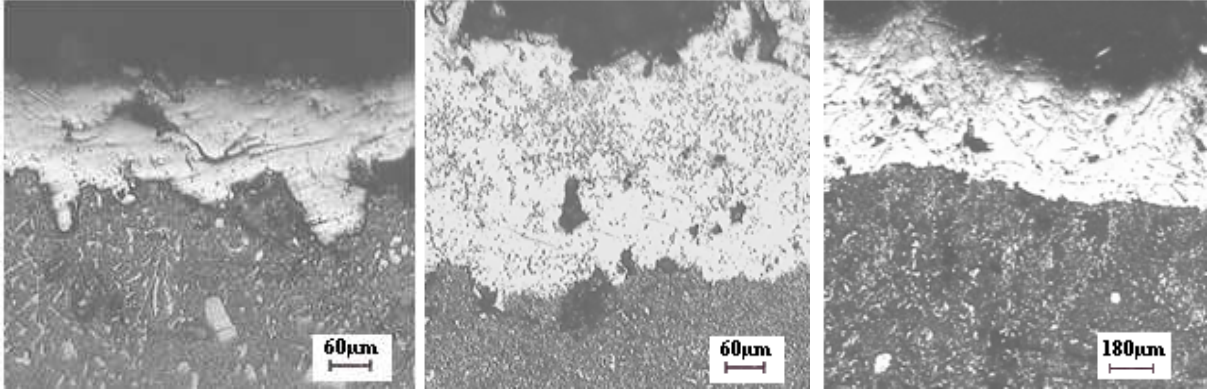
AS13 2 sec

AS13 6 sec

AS13 10 sec

La projection du molybdène sur AS13

La projection a l'ambiante

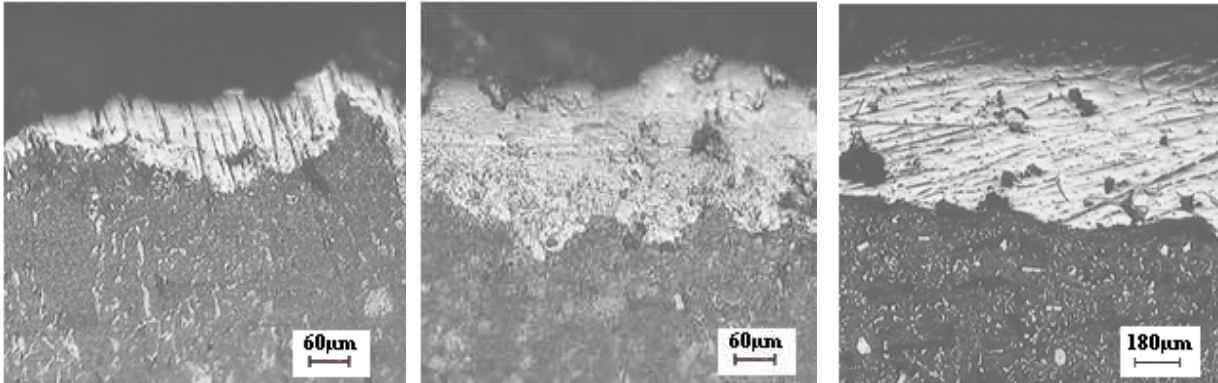


AS13 4 sec

AS13 8 sec

AS13 10 sec

La projection avec un préchauffage



AS13 2 sec

AS13 6sec

AS13 10 sec

Bibliographies

[1]: BARRALIS, MEADER

Précis de métallurgies

5^{ème} édition, afnor, Nathan 1990

[2] CHRISTIAN VARGEL

Le comportement de l'aluminium et ses alliages

Dunod technique, paris 1979

[3] : Sylvain JACOB

Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie.

Technique de l'ingénieur (Société AREGA), 2005

[4] Sylvain JACOB

Données numériques sur les alliages d'aluminium de moulage.

Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M449 (Société AREGA), 2005.

[5] : www.wikipedia.org/projection thermique

[6] : Lech powlowski

Dépôts physiques, techniques, microstructures et propriétés

Première édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 2003

[7] : Alain PRONER

Revêtements par projection thermique

Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645 (Société AREGA), 2005

[8]: G. England

Nature of thermal spray coatings. (Journée Scientifique, ONERA 2003)

[9] M. LARIBI

Caractérisation et modélisation métallurgique et mécanique de matériaux à gradients fonctionnels réalisés par projection thermique

Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2003

[10] Guide d'emploi de la projection thermique

CETIM 1989

[11]. P. J. CUNAT.

Aciers inoxydables : Critères de choix et structure.

Techniques de l'Ingénieur. M4540. Traité Des Matériaux. 2003

[12]. Guy. DAVID.

Les aciers inoxydables. Techniques et documentations-Lavoisier,

Les éditions de physique, 1990

[13]. R. N. GUNN.

Duplex Stainless Steels. 2000

[14]. www.wikipedia.org/acier_inoxydable

[15]. Corinne BOURGÈS MONNIER

Propriétés du molybdène et des alliages à base de molybdène.

Techniques de l'Ingénieur. M565. Traité Des Matériaux. 2003

[16] : Fiche technique de société nationale des véhicules industriels

Produit pour dégazage, produit affinant, produit pour la protection du bain.

SNVI 2009.

[17] : Mme DJEZIRI Djamila

Comportement électrochimique d'un dépôt en acier inoxydable réalisé par projection thermique.

Thèse de magistère, ENP 2007.