

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de Fin d'Études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en
Métallurgie

Étude de la projection thermique d'un acier
inoxydable et du molybdène sur un substrat d'alliage
d'aluminium 44100 (A-S13)

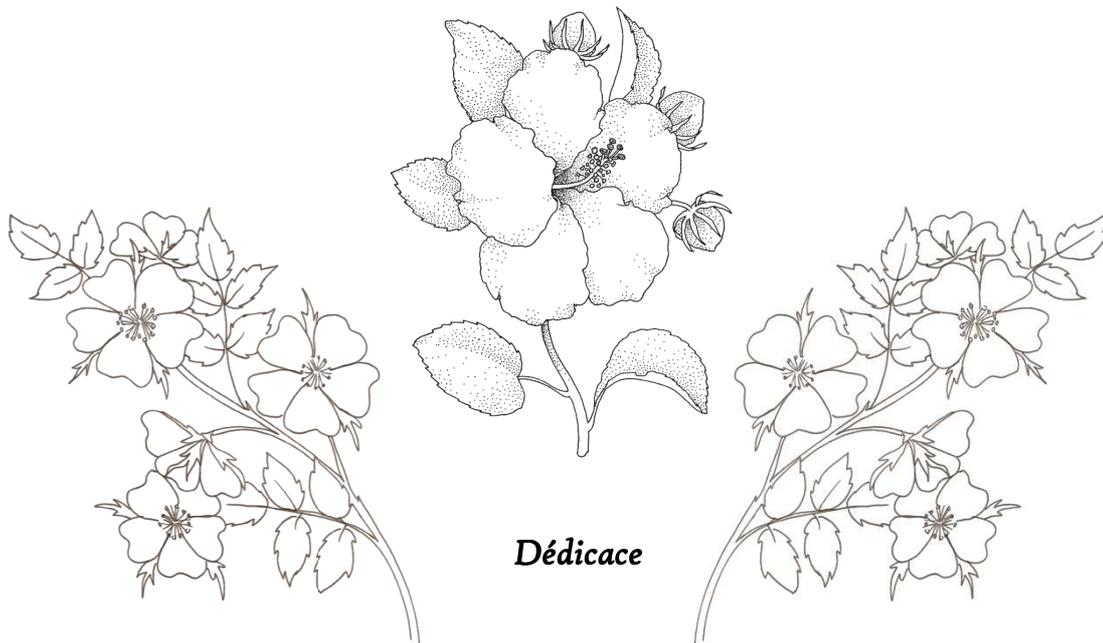
Proposé et encadré par :

Mr. E. SALHI

Réalisé par :

Walid-Nadjib BOUKHELIF-YAHIA

Promotion juin 2010.



Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères que je possède au monde :

A mon père qui, par ses conseils judicieux ses encouragements et sa tendresse m'a mené sur le chemin de la réussite. Qu'il trouve dans ce travail, une bien mince récompense

A ma mère qui, par sa douceur et son amour sans limite, a su m'inculquer le sens du devoir, de la persévérance et de la responsabilité. Qu'elle trouve dans ce modeste ouvrage ma reconnaissance et mes vifs remerciements

A mes grands parents qui étaient toujours présent par leur tendresse et leur bienveillance.

A mes frères et sœurs Selma, Yacine, Meriem et Riadh pour leur soutien

A mes oncles et tantes pour leurs encouragements

Aux familles Bouafia et Boukhelif-Yahia

A tous mes amis

A tous mes collègues

Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement mon promoteur, Monsieur E. SALHI pour m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire au bon déroulement de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils, ses réflexions ainsi que la grande indépendance qu'il a su m'accorder m'ont été très utiles tout au long de ce mémoire.

Je remercie Monsieur DAIMELLAH de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury. Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur CHITROUB et Madame KECHOUD qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Mr. NAILI Chef du département de fonderie d'aluminium au niveau de la SNVI de Rouiba ainsi que tout son personnel pour leur aide et leur encouragement.

J'exprime toute ma gratitude à l'ensemble du collectif de l'entreprise «Algérie Métallisation» de Dar-El-Beida et à leur tête Mr. Y. SALAH pour leur bienveillance qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Je n'oublie de remercier les enseignants de l'école nationale polytechnique, en particulier ceux du département de métallurgie, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation.

Je ne saurais oublier mes collègues de l'ENP avec qui j'ai passé d'inoubliables moments, ainsi que tous mes amis de la cité universitaire Bouraoui Amar particulièrement ceux de l'ESI : Shérif, Mohamed, Adel et toute l'équipe El-Saada.

J'aurais une pensée toute particulière pour ma chère famille dont le soutien m'a été précieux.

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

*« On n'enseigne pas ce que l'on veut ; je dirai même que l'on
n'enseigne pas ce que l'on sait ou ce que l'on croit savoir.
On n'enseigne que ce que l'on est. »*

Jean JAURES

ملخص

قمنا في هذه الدراسة بإجراء تلبيس لخليط من معدن الألمنيوم المعد للصب ذو الرمز 44100 (A-S 13) باستعمال تقنية الرش الحراري بواسطة القوس الكهربائي بين سلكين. استخدمنا نوعين من المواد المعدنية (خليط من الفولاذ الغير قابل للأكسدة 55 E "Thérmanit" و معدن الموليبيديوم) على خليط الألمنيوم 44100 (A-S13) لتحقيق مجموعة من متعددات مواد مع أو بدون طبقة تثبيت من خليط النيكل و الألمنيوم 75 E.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحديد خصائص متعددات المواد المصنوعة. الخصائص التي تم التركيز عليها هي خشونة السطح, نسبة المسامات, درجة الالتصاق و المايكرو صلابة. و قد سمحت لنا النتائج المتحصل عليها من مقارنة الطبقات المختلفة التي تم تلبيسها لخليطنا 44100 (A-S13) و بالتالي اختيار متعدد مواد مقاوم للتآكل.

كلمات المفتاح : الرش الحراري, الألمنيوم 44100 (A-S13), الفولاذ المقاوم للتأكسد 55 E , الموليبيديوم, النيكل-ألمنيوم 75 E .

Résumé

Dans cette étude nous avons procédé au revêtement d'un alliage d'aluminium de fonderie 44100 (A-S13) coulé en coquille par la technique de projection thermique à l'arc électrique entre deux fils. On a réalisé deux types de dépôts métalliques (acier inoxydable 55 E « Thérmanit » et molybdène) avec et sans couche d'accrochage en Ni-Al (75 E).

L'objectif principal est la caractérisation des dépôts réalisés. Cette caractérisation est portée sur la rugosité, le taux de porosité, l'adhérence et la microdureté. Ceci nous a permis de comparer les différents multimatériaux synthétisés et ainsi adopter un dépôt résistant à l'usure.

Mots clés : projection thermique, aluminium 44100 (A-S13), acier inoxydable 55 E, molybdène, Ni-Al 75 E.

Abstract

In this work we have applied a coating to a cast aluminum alloy designate as 44100 (A-S13) with the technique of thermal wire arc spraying. Two types of metallic deposits (stainless steel 55 E "Thérmanit" and molybdenum) with and without a bonding layer of Ni-Al alloy (75 E) are carried out.

The main goal is to characterize the deposits made. Characterization is focused on the roughness, the rate of porosity, adhesion and microhardness. This allowed us to compare the different multimaterials synthesized and adopt a wear resistant deposit.

Key words : thermal spraying, aluminium 44100 (A-S13), stainless steel 55 E, molybdenum, Ni-Al 75 E.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I. Recherche bibliographique

I.1	Traitements de surfaces et revêtements.....	3
I.1.1	Classification des traitements de surfaces.....	3
I.1.2	Les dépôts physiques	4
I.1.3	Classification des dépôts physiques.....	5
I.1.4	Les dépôts granulaires	6
I.2	La projection thermique	7
I.2.1	Principe et généralité	7
I.2.2	Techniques de projection thermique	8
I.2.3	Préparation du substrat avant dépôt	14
I.3	Multimatériau et dépôt.....	16
I.3.1	Les revêtements par projection thermique.....	16
I.3.2	Formation des dépôts par projection thermique	17
I.3.3	Phénomènes au contact particule/substrat	17
I.3.4	Caractéristiques du dépôt.....	21
I.4	L'aluminium et ses alliages	24
I.4.1	Généralité sur l'aluminium.....	24
I.4.2	Familles d'alliages d'aluminium	25
I.4.3	Les alliages de corroyage	25
I.4.4	Les alliages de moulages.....	26
I.4.5	Les alliages au silicium, famille 40000	26
I.4.6	L'alliage 44100.....	27

Chapitre II. Techniques expérimentales

II.1	Le substrat.....	29
II.1.1	Elaboration des pièces de fonderie.....	30
II.1.2	Préparation des échantillons pour la projection thermique.....	32
II.2	La projection thermique	34

II.2.1	Equipement de projection.....	34
II.2.2	Paramètres et conditions de projection thermique.....	36
II.2.3	Matériaux utilisés pour la réalisation des dépôts	37
II.2.4	Caractérisation des dépôts.....	40

Chapitre III. Résultats et interprétations

III.1	Caractérisation du substrat	43
III.1.1	Microstructure.....	43
III.1.2	La microdureté	44
III.1.3	La rugosité	44
III.2	Caractérisation des dépôts	45
III.2.1	La microstructure	45
III.2.2	Epaisseur des dépôts.....	46
III.2.3	Rugosité des dépôts	49
III.2.4	Porosité dans les dépôts.....	50
III.2.5	Présence d'oxydes	51
III.2.6	L'adhérence	52
III.2.7	La microdureté	56
	Conclusion générale.....	65
	Références bibliographiques	67

Annexes

Annexe 1	69
Annexe 2	73

Liste des tableaux

Tableau I-1. Quelques techniques représentatives des dépôts physiques [10].....	6
Tableau I-2. Techniques de projection thermique [10].....	7
Tableau I-3. Comparaison des différentes techniques de projection thermique [12]...	13
Tableau I-4. Les propriétés physiques de l'aluminium [9].....	24
Tableau I-5. Les familles d'alliages d'aluminium [6-20].....	25
Tableau II-1. Composition chimique de l'alliage 44100 (A-S13) [26]	29
Tableau II-2. Caractéristiques mécaniques de l'alliage 44100 (A-S13) [27]	29
Tableau II-3. Paramètres du procédé arc à deux fils selon « ALGERIE METALLISATION ».....	36
Tableau II-4. Autres paramètres de projection	36
Tableau II-5. Composition de l'acier inoxydable 55E (Thermanit) [34]	37
Tableau II-6. Valeurs de l'énergie de fusion de quelques métaux [36].....	39
Tableau II-7. Tests des propriétés mécaniques des dépôts [10]	41
Tableau III-1. Epaisseurs de l'ensemble des dépôts en fonction de la durée de projection.....	48
Tableau III-2. Rugosité des dépôts réalisés par projection thermique.....	49
Tableau III-3. Porosité des dépôts en acier inoxydable 55 E.....	51
Tableau III-4. Porosité des dépôts en molybdène	51

Liste des figures

Figure I-1. Déroulement de tout traitement de surface [8]	3
Figure I-2. Principaux constituants d'une installation de projection thermique [3]	8
Figure I-3. Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [3]	9
Figure I-4. Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [3]	9
Figure I-5. Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [3].....	10
Figure I-6. Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu [3] ...	11
Figure I-7. Principe de fonctionnement d'une torche plasma [3]	12
Figure I-8. Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [3].....	13
Figure I-9. Schéma représentant les différentes classes de revêtements.....	16
Figure I-10. Structure d'un dépôt réalisé par projection thermique [13]	17
Figure I-11. Schéma d'écrasement d'une particule [14]	18
Figure I-12. Différentes morphologies de particules étalées en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact sur une surface lisse [16-17]	19
Figure I-13. Morphologie des lamelles a) crêpe b) fleur [10]	20
Figure I-14. Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface [19]....	23
Figure I-15. Diagramme d'équilibre Aluminium-Silicium [23]	27
Figure I-16. Avant modification [25].....	28
Figure I-17. Après modification [25]	28
Figure I-18. Propriétés mécaniques 1) modifiées 2) non modifiées [24]	28
Figure II-1. Fours de fusion (S.N.V.I)	30
Figure II-2. Lingots A-S13 de 7kg.....	30
Figure II-3. Poteyage de l'outil	31
Figure II-4. Pièce finale obtenue	31
Figure II-5. Forme et dimensions des échantillons.....	32
Figure II-6. Angles arrondis par meulage [10]	32
Figure II-7. Chambre de sablage avec sableuse à surpression	33
Figure II-8. L'opération de sablage	33
Figure II-9. Poste de projection thermique	34
Figure II-10. Principe de fonctionnement du pistolet THRMO-SPRAY 234 [35].....	35

Figure II-11. Forme des échantillons revêtus : a) sans couche d'accrochage b) avec couche d'accrochage	37
Figure II-12. Estimation de la résistance à l'usure (selon K. Kato) [36]	38
Figure II-13. Energie spécifique de coupe et énergie de fusion (d'après Malkin et Joseph) [36].....	39
Figure II-14. Test d'indentation (microdureté).....	42
Figure III-1. Microstructure de l'alliage 44100 (A-S13).....	43
Figure III-2. Test d'indentation (microdureté HV _{100 grf})	44
Figure III-3. État de surface du substrat après sablage sur une distance de 2cm	44
Figure III-4. Profil de rugosité du substrat après sablage	44
Figure III-5. Construction de dépôt réalisé par projection thermique : a) acier inoxydable E55 b) molybdène	45
Figure III-6. Profile d'épaisseurs, de la rugosité du substrat et de la surface d'un dépôt en acier inox E55 avec couche d'accrochage.....	46
Figure III-7. Dépôts à différentes épaisseurs d'acier inox E55 sans couche d'accrochage.....	46
Figure III-8. Dépôts à différentes épaisseurs d'acier inox E55 avec couche d'accrochage.....	47
Figure III-9. Dépôts à différentes épaisseurs de molybdène sans couche d'accrochage.....	47
Figure III-10. Dépôts à différentes épaisseurs de molybdène avec couche d'accrochage.....	47
Figure III-11. Évolution de l'épaisseur en fonction du temps pour dépôts en acier : inoxydable E55 a) sans couche d'accrochage b) avec couche d'accrochage	48
Figure III-12. Évolution de l'épaisseur en fonction du temps pour dépôts en molybdène a) sans couche d'accrochage b) avec couche d'accrochage.....	49
Figure III-13. Dépôts présentant une porosité a) acier inox E55 b) molybdène	50
Figure III-14. Dépôts oxydés a) acier inoxydable E55 b) molybdène.....	51
Figure III-15. Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette	52
Figure III-16. Phénomène d'ancrage pour les dépôts en acier inox E55	53
Figure III-17. Phénomène d'ancrage des particules de molybdène	53
Figure III-18. Dépôts sur substrat sans couche d'accrochage : acier inox E55 b) molybdène	54
Figure III-19. Dépôts d'acier inoxydable E55 avec couche d'accrochage.....	55
Figure III-20. Dépôts en molybdène avec couche d'accrochage	55

Figure III-21. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 224 μm sans couche d'accrochage	57
Figure III-22. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 447 μm sans couche d'accrochage	57
Figure III-23. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 787 μm sans couche d'accrochage	58
Figure III-24. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 905 μm sans couche d'accrochage	58
Figure III-25. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 178 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.....	59
Figure III-26. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 401 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.....	59
Figure III-27. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 619 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.....	60
Figure III-28. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 771 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.....	60
Figure III-29. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 259 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	61
Figure III-30. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 460 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	61
Figure III-31. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 607 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	62
Figure III-32. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox E55 à 701 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	62
Figure III-33. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 308 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	63
Figure III-34. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 447 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	63
Figure III-35. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 715 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	64
Figure III-36. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 1056 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.....	64

Introduction générale



L'homme n'entre en contact avec les matériaux solides que par leur surface. C'est donc celle-ci qui est importante. C'est la surface qui détermine dans une large mesure notre impression d'un objet, qui le rend plaisant, qui le vend. Les femmes de l'ancienne Égypte en savait déjà quelque chose. Mais cet aspect décoratif n'est qu'une des fonctions d'une surface technique. La plupart des pièces ne sont pas conçues uniquement pour l'interaction avec l'œil humaine. Elles doivent interagir avec d'autres pièces pour transmettre un mouvement, absorber une énergie, etc.... Mais de nouveau c'est par sa surface que toute pièce interagit avec son environnement, qu'elle exerce sa fonction. Une pièce qui n'interagit pas avec son environnement est inutile.

C'est la nécessité de conserver la surface fonctionnel d'une pièce qu'à donner naissance aux traitements de surface dont l'objectif est de conférer des propriétés différentes de celles de la masse, le plus souvent en termes de :

- résistance à l'usure.
- résistance à la corrosion.
- tenue en fatigue (résistance à l'amorçage des fissures).
- aspect extérieur, esthétique.

Dans la course actuelle aux procédés ayant le meilleur rapport qualité prix, les dépôts épais ont désormais un rôle clef parmi les nombreuses techniques de traitement de surface [1]. La progression des connaissances sur les matériaux ainsi que sur les procédés de fabrication des revêtements est actuellement très rapide. Parmi les procédés connus, la projection thermique est sans contestation l'une des techniques les plus appréciées. Introduit en 1909 par Dr. Schoop [2], la projection thermique s'est développée en premier temps d'une façon empirique et coûteuse limitant son usage aux domaines aérospatial, nucléaire et militaire [3]. Au cours du temps, les progrès, grâce à la recherche fondamentale et appliquée, ont amélioré la qualité et la reproductibilité du dépôt, tout en diminuant le coût de production. Ces progrès ont permis d'élargir les applications de la projection thermique qui s'étendent actuellement aux domaines automobile, énergie, outillage, etc.... Cependant, les résultats ne sont pas encore tout à fait satisfaisants et l'élargissement des applications demande une meilleure compréhension des phénomènes intervenant au cours du dépôt, de façon à améliorer la qualité et la fiabilité des couches projetées.

De nombreux matériaux peuvent ainsi bénéficier des avantages apportés par les techniques de projections thermiques. Parmi ces matériaux les plus convoités c'est l'aluminium.

La légèreté est un atout majeur. C'est le premier des atouts de l'aluminium, au point qu'on a très longtemps utilisé l'expression « alliages légers » pour désigner ce qu'on appelle maintenant les alliages d'aluminium [4-5]. Plusieurs domaines d'applications tirent profit de la légèreté de l'aluminium parmi elles, le transport d'énergie électrique, les applications mécaniques et surtout le transport (il entre pour au moins 75% du poids à vide des avions, fait gagner entre 30% et 50% d'allègement pour les véhicules industriels et jusqu'à 40% à 50% pour les coques de navire équivalentes en acier) [6]. Mais d'un autre côté, l'aluminium possède des propriétés mécaniques réduites [7].

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de la possibilité d'améliorer les propriétés tribologiques d'un alliage d'aluminium 44100 (A-S13) par projection thermique à l'arc on procédant aux expériences de caractérisations systématiques pour évaluer les propriétés du revêtement ainsi réalisé.

Ce manuscrit comporte trois sections principales comme suit :

- La première section est consacrée à l'étude bibliographique relative à la projection thermique avec une généralité sur les traitements de surface. Les mécanismes et les phénomènes intervenant lors de la projection et la formation du dépôt ainsi qu'une partie consacré aux alliages d'aluminium.
- La deuxième partie est réservée aux techniques expérimentales allant de la technique de projection à l'arc électrique aux techniques de caractérisations ainsi que les processus relatifs à l'élaboration des multimatériaux.
- La troisième et dernière section comporte les interprétations concernant les résultats obtenus aux cours de notre étude.

Chapitre I

Recherche bibliographique



I.1 Traitements de surface et revêtements

Un petit regard autour de nous, nous montre que presque tous les objets qui nous entourent ainsi que leurs composants ont subi des traitements de surface. Nous trouvons les fonctions suivantes qui peuvent être combinées [1] :

- décoration : couleur, réflectivité (brillant – mat), messages.
- protection contre l'attaque physico-chimique de l'environnement : corrosion, oxydation, dissolution, transpiration, diffusion.
- gestion de l'interaction physico-chimique avec l'environnement : mouillabilité, biocompatibilité, diffusion, isolation électrique.
- protection contre les attaques mécaniques de l'environnement : abrasion, érosion, rayage, écaillage.

La protection de l'intégrité superficielle, et ainsi que celle du volume est donc une fonction qui est le plus souvent confiée à un traitement de surface. Les propriétés du matériau de base ne servent qu'à maintenir la forme.

I.1.1 Classification des traitements de surface

Il existe des aspects communs à toutes les méthodes de traitements de surface. En effet, tout traitement de surface comprend la même séquence d'étapes indiquée sur la figure I-1:

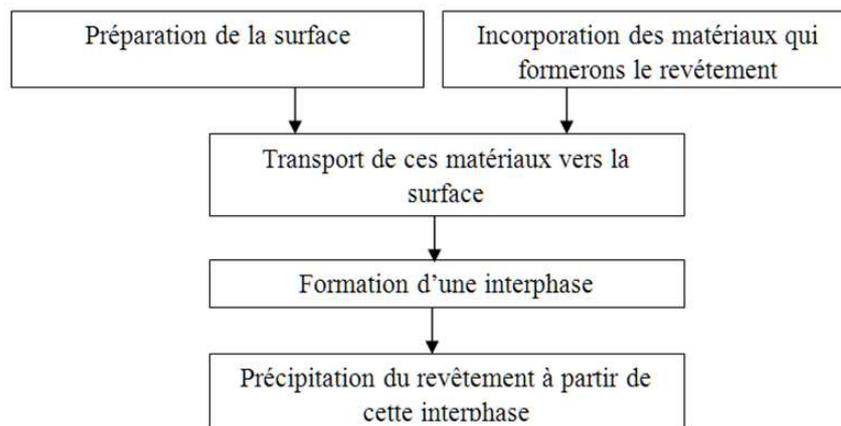


Figure I-1. Déroulement de tout traitement de surface [8].

On peut classer les traitements de surface selon différentes catégories : matériau du substrat, classe du matériau déposé, phase du matériau employé, utilisation, etc.

Nous avons retenu la classification suivante en deux catégories [9] :

I.1.1.1 Traitement d'une couche superficielle de la pièce par modification de la microstructure et/ou de la composition initiale

a) Traitements de transformation structurale

Trempe superficielle par courants de haute fréquence, fusion superficielle par faisceau laser...

b) Traitements thermochimiques

Cémentation (diffusion superficielle de carbone dans un acier), nitruration (diffusion superficielle d'azote), carbonitruration, boruration (diffusion superficielle de bore)...

c) Traitements de conversion chimique

Réaction entre le substrat et un produit extérieur conduisant à la formation d'une couche superficielle de composé protecteur (Oxydation anodique, Sulfuration, Phosphatation...).

d) Traitements mécaniques

Grenailage (projection de billes d'acier, de céramique ou de verre sur la surface), martelage, galetage (parcours de la surface par une roulette en acier à outils avec forte pression de contact)...

I.1.1.2 Application d'un revêtement de nature différente du substrat

Les techniques de traitements de surface appartenant à cette catégorie sont connues sous le nom de dépôts physiques.

I.1.2 Les dépôts physiques

Le mot « dépôts physiques » est un terme générique qui correspond à un procédé de dépôt formé à partir d'espèces constituantes « atomes, molécules, particules solides, particules liquides... » [10].

Ces espèces viennent d'une source et sont par la suite transportées vers un substrat au travers d'un milieu du type :

- Passif (vide ou basse pression, air à pression atmosphérique, atmosphère inerte...)
- Actif (plasma, gaz réactif, liquide...)

Le terme dépôt physique vient du mécanisme physique de génération des espèces constituant le dépôt à partir de sa source. Les exemples de ce mécanisme sont les suivants [10] :

- L'évaporation dans la technique PVD.
- L'ablation dans la technique PLD.
- L'injection de gaz dans la technique CVD.
- L'injection de particules dans les techniques de projections thermiques.

Le milieu passif ne modifie pas les espèces, contrairement au milieu actif. Il est précisé que le plasma dans les procédés atomistiques est un milieu actif, car il peut modifier la composition chimique des espèces (atomes, ions, molécules) constituant un dépôt. Cette modification est négligeable dans les procédés granulaires et massifs, dans lesquels les espèces sont bien plus grandes (particules contenant 10^{13} atomes) et le temps d'interaction avec le milieu assez bref pour qu'une modification puisse avoir lieu.

I.1.3 Classification des dépôts physiques

Les dépôts physiques peuvent être classés, dans l'ordre croissant, selon la taille des espèces les constituants [9,10] :

- dépôts atomistiques.
- dépôts granulaires.
- dépôts massifs.

Dans les techniques atomistiques, les espèces constituant les dépôts sont des atomes, des ions et des molécules. Les dépôts granulaires utilisent des particules solides, de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre. Les particules qui dépassent $100\ \mu\text{m}$ de diamètre sont appliquées dans les dépôts massifs. Les techniques de dépôts appartenant aux classes définies ci-dessus sont très nombreuses. Le tableau I-1 ci-dessous est porté sur les techniques les plus représentatives du point de vue des applications industrielles actuelles ou potentielles.

Tableau I-1. Quelques techniques représentatives des dépôts physiques [10].

Dépôts atomistiques	Dépôts granulaires	Dépôts massifs
<p>Dans milieu passif :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ablation laser PLD - Evaporation <p>Dans milieu du plasma :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pulvérisation - Ion plating - Evaporation dans atmosphère réactif ARE - Dépôts chimique en phase vapeur assisté au plasma PECVD <p>Dans milieu du gaz réactif :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dépôt chimique en phase vapeur CVD 	<ul style="list-style-type: none"> - Projection par flamme FS - Projection par plasma à l'air APS - Projection à l'arc AS - Projection à haute vitesse HVOF - Projection par plasma sous vide VPS - Projection par détonation 	<ul style="list-style-type: none"> - Rechargement par plasma PTA <p>Rechargement laser en une étape :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cladding - Alloying LSA - Dispersion d'une phase dure <p>Rechargement en deux étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cladding - Alloying LSA - Dispersion d'une phase dure

I.1.4 Les dépôts granulaires

Les espèces qui constituent les dépôts granulaires sont des particules dont les dimensions varient entre quelques dizaines et une centaine de micromètres. Ces particules entrent en contact avec un substrat à l'état liquide, partiellement liquide ou solide. La microstructure des dépôts granulaires résulte de la solidification et du frittage de ces particules. Les techniques de dépôts granulaires font partie des techniques de projection thermique [10].

I.2 La projection thermique

Les premières applications industrielles de la projection thermique 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), ou encore en décoration (dépôts de bronze). Dès 1914 des essais de projection par arc électrique furent réalisés. C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de rénovation de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique. La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés (plasma, canon à détonation, HVOF...) et de nouveaux matériaux associés (céramiques, carbures, composites, superalliages...) [3].

I.2.1 Principe et généralité

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. Les particules du matériau projetées sur le substrat se déforment en grains lenticulaires (lamelles). Les lamelles s'accrochent au substrat, se solidifient ou/et se frittent entre elles et forment le dépôt. La surface de base ne subit ainsi aucune fusion et l'adhérence du dépôt est mécanique [2].

Les techniques de projections thermiques se développent suivant trois axes (tableau I-2).

- L'augmentation de l'énergie cinétique des particules.
- L'amélioration de la productivité de la projection
- Le meilleur contrôle d'atmosphère de projection.

Tableau I-2. Techniques de projection thermique [10].

Techniques à haute énergie cinétique des particules	Techniques à haute productivité de projection	Techniques à atmosphère contrôlé
<ul style="list-style-type: none"> - HVOF - D-gunTM détonation gun - CGSM 	<ul style="list-style-type: none"> - FS - APS - AS - HEP - WPS - Triplex 	<ul style="list-style-type: none"> - VPS - SPS - IPS

La morphologie des matériaux utilisés pour la projection thermique joue un rôle très important. Ces matériaux peuvent avoir la forme de poudre, de fil métallique ou de barreau céramique. La poudre est utilisée le plus souvent. La qualité d'un dépôt est influencée non seulement par sa composition chimique, mais aussi par sa morphologie, les phases cristallines et par sa granulométrie. La qualité d'un dépôt dépend également de la régularité avec laquelle une poudre est délivrée dans la torche de projection. Les interruptions ou les oscillations du débit de poudre sont à éviter [10].

I.2.2 Techniques de projection thermique

Un équipement de base est commun à tous les différents procédés de projection thermique (figure I-2).

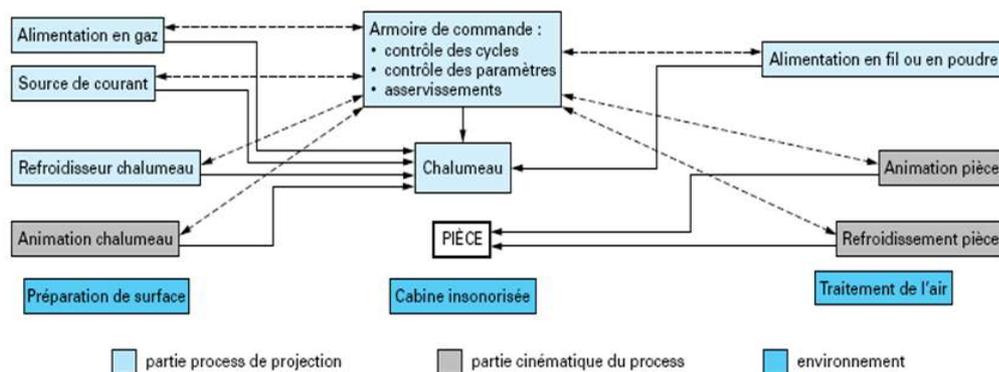


Figure I-2. Principaux constituants d'une installation de projection thermique [3].

I.2.2.1 Projection par flamme (FS)

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme. La température d'une flamme oxycombustible varie de 2 800 °C (oxypropane) à 3 150 °C (oxyacétylène). Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2 800 °C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme. Le matériau à projeté est introduit sous forme de poudre (FS-poudre) ou d'un fil (FS-fil) [2,11].

a) FS-poudre

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 oxycombustible (figure I-3) et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion [2,11].

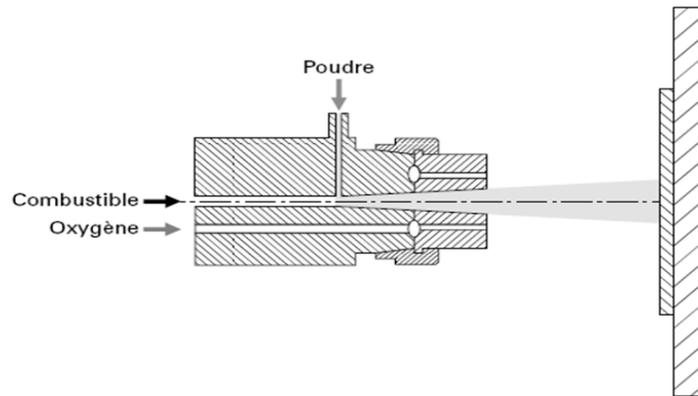


Figure I-3. Schéma du principe d'un pistolet flamme-poudre [3].

b) FS-fil

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 (figure I-4). Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé [2,11].

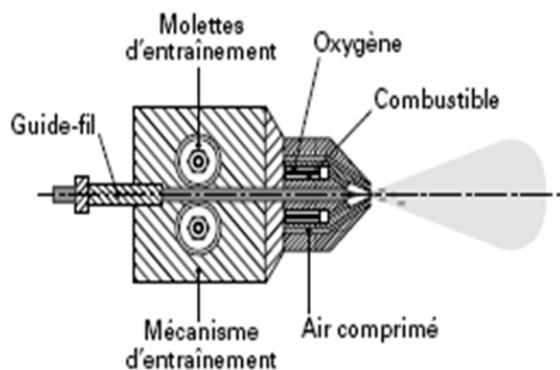


Figure I-4. Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [3].

Des buses à gaz différentes permettent l'utilisation de gaz tels que acétylène, propane ou tétrène par exemple, alors que différentes buses à air modifient l'aspect et les caractéristiques du dépôt. Le système d'entraînement permet une régularité parfaite de l'avance du fil, en particulier grâce à un couple moteur constant.

I.2.2.2 Projection hypersonique

Ce type de projection tient son nom de la vitesse de sortie des gaz qui se situe entre Mach 1 et Mach 2. Deux procédés présentent ce type de caractéristique [11].

- la projection hypersonique à tir discontinu.
- la projection hypersonique à tir continu.

a) Projection hypersonique à tir discontinu (D-gun)

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé canon à détonation (figure I-5), 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. Le régime de projection est donc discontinu. Ce type d'installation permet d'obtenir des dépôts de caractéristiques remarquables du point de vue de la compacité (porosité inférieure à 1 %) et de l'adhérence (souvent supérieure à 80 MPa). Les épaisseurs des dépôts sont en général limitées à 0,2 mm. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de Cr ou de W avec liant métallique Ni ou Co, l'alumine et l'oxyde de chrome [11].

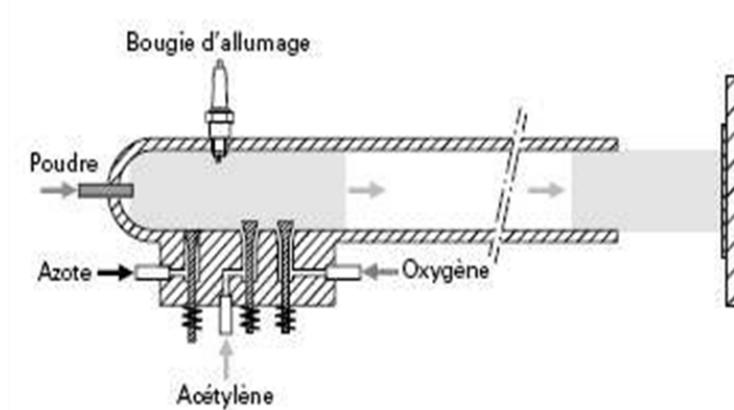


Figure I-5. Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [3].

b) Projection hypersonique à tir continu

Cette variante des procédés flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion (figure I-6). 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.

L'HVOF utilise la combustion de deux gaz : d'une part, O_2 et d'autre part, propane propylène ou hydrogène. L'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène - air comprimé pour la combustion. Les gaz pénètrent dans la chambre de combustion puis sont éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bar). La poudre est injectée à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où elle est fondue et accélérée dans la tuyère à une vitesse proche de celle du son.

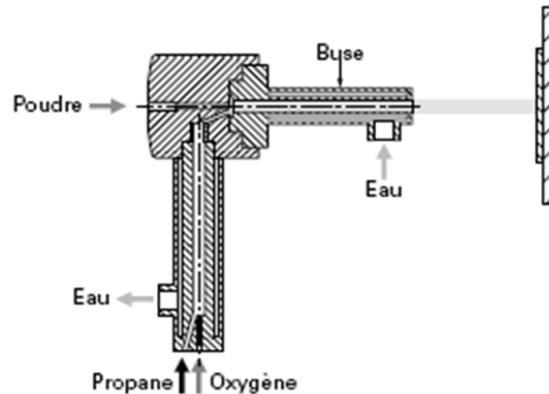
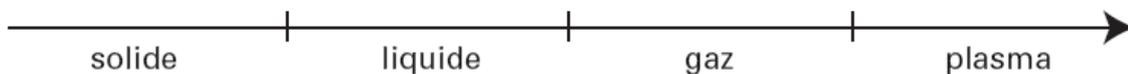


Figure I-6. Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu [3].

Pendant leur temps de séjour très court dans la flamme, les particules sont amenées à l'état pâteux, l'énergie cinétique acquise dans la tuyère permet la réalisation de dépôt d'excellente qualité : faible porosité (< 2 %), bonne adhérence (70 à 100 MPa) et faible rugosité de surface. Si ce procédé est d'une relative simplicité d'emploi, le coût d'utilisation horaire a été longtemps un frein à son développement industriel (la consommation en gaz pouvant atteindre 1 000 L/min [11]).

I.2.2.3 Projection plasma soufflé (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. 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 vitesse et 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 (oxydation en particulier) [3].

Le procédé de projection plasma soufflé utilise comme source thermique un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général (figure I-7). Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15 000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat. Les mélanges gazeux utilisés sont en général formés d'Ar et de H₂ [8,11].

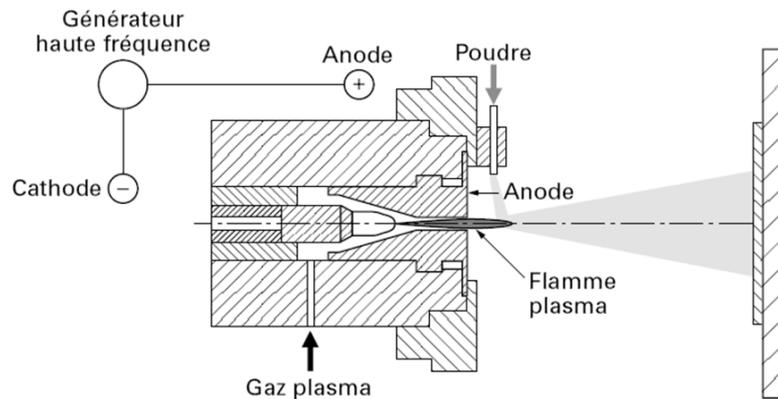


Figure I-7. Principe de fonctionnement d'une torche plasma [3].

I.2.2.4 Projection par arc électrique entre deux fils (AS)

Le principe de cette technique de projection thermique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu et le projette sur le substrat (figure I-8). Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A. Les fils sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques ou par des turbines à air. À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes contact permettant, d'une part, le positionnement du fil avant entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils. La température atteinte et l'énergie cinétique élevée acquise par les particules grâce au jet d'air comprimé ($V = 250$ m/s) permettent des projections avec des caractéristiques de dépôts performantes (porosité de 5 à 10%, force d'accrochage entre 20 à 40 MPa). Le procédé de projection par arc électrique est un procédé très simple à mettre en œuvre, et particulièrement bien adapté aux impératifs de fiabilité et de reproductibilité imposés par la production en moyennes et grandes séries. Les matériaux les plus couramment utilisés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre, le molybdène et les aciers. Des matériaux issus de la technologie des fils fourrés, tels que des alliages du type Ni-Cr-Al, Ni-Mo-Al, Fe-Cr-C-Mn, des fils chargés en carbures de chrome ou de tungstène, ou encore des composites Al-Si chargés graphite, sont aujourd'hui en plein essor.

Le procédé de projection par arc électrique connaît donc un développement récent, en regard de ses performances techniques en progression et de son coût d'investissement faible [2,3].

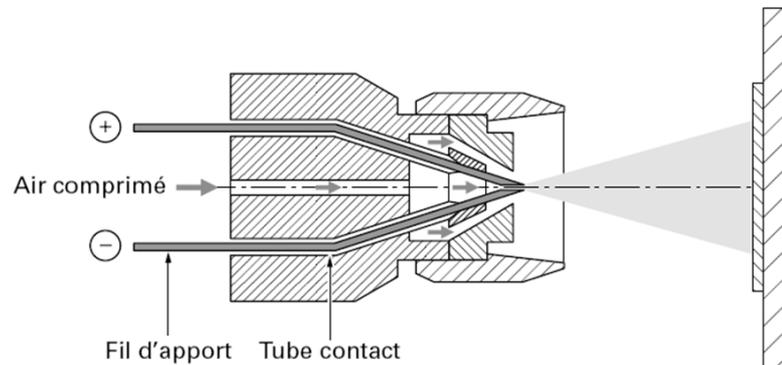


Figure I-8. Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [3].

Le tableau I-3 représente une comparaison des différentes techniques de projections thermiques pour mieux apprécier les avantages de chacune d'entre elles.

Tableau I-3. Comparaison des différentes techniques de projection thermique [13].

Caractéristiques	FS-poudre	FS-fil	AS	APS	HVOF	D-gun
Source de chaleur	Flamme oxtacétylénique	Flamme oxtacétylénique	Arc électrique	Plasma	Flamme oxtacétylénique	Flamme oxtacétylénique
Température de flamme (°C)	3 000	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé	Plasma (H ₂ /Ar)	Gaz flamme	Gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	250	200	700	950
Forme du produit d'apport	Poudre	Fil-cordon	Fil	Poudre	Poudre	poudre
Taux de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (%) (*)	50	70	80	70	70	70
Adhérence (Mpa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Épaisseur (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemple de matériaux d'apport	- métaux - céramiques - carbures	- métaux - céramiques - carbures	- métaux	- métaux - céramiques - carbures	- métaux - carbures	- carbures - céramiques

(*) pourcentage de poudre projetée qui adhère au substrat.

I.2.3 Préparation du substrat avant dépôt

« Toute opération élémentaire est une préparation à celle qui la suit »

La notion de préparation doit être prise en compte durant l'élaboration de la gamme de traitement sinon elle réapparaîtra pour le traitement des dysfonctionnements. En effet dans la plupart des cas, une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défaillant. L'idéal d'une bonne préparation est de permettre un contact aussi intime que possible entre la surface à recouvrir et le revêtement à exécuter, ou de conduire à une surface suffisamment active pour faciliter l'adhérence du dépôt.

I.2.3.1 Le nettoyage de la surface

Le nettoyage pourrait être défini comme la réduction de contamination à un niveau acceptable. Les contaminations typiques d'une surface résultent de :

- La réaction avec l'atmosphère ambiante (oxydes, produits de la corrosion...).
- L'adsorption physique de l'atmosphère ambiante (l'eau).
- Les traces de procédés précédents (masques de polymères, huiles...).
- Les particules de poussières.
- Les produits de dégazage lors d'action à haute température sur le substrat.

a) Dégraissage

Ce que l'on cherche à éliminer dans cette opération, ce sont des graisses animales, végétales ou minérales ainsi que leurs produits de dégradation et toutes les souillures qu'elles retiennent. Le dégraissage s'effectue soit par dissolution en milieu de solvants organiques, soit par saponification (donc en milieu alcalin), soit par émulsification à l'aide d'un tensioactif. Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse. De même un effet mécanique (jets, brosses, ultrasons, bulles de gaz émis par électrolyse) est souvent nécessaire.

b) Décapage (décalaminage, dérouillage, dérochage)

Le nom générique de décapage regroupe les procédés éliminant les produits solides adhérents au métal (oxydes, sable de fonderie). Les méthodes de décapage sont chimiques, électrochimiques, mécaniques ou thermiques. Les méthodes chimiques et électrochimiques utilisent des solutions agressives acides ou alcalines, ou encore des oxydants forts.

c) Ébavurage, polissage, brillantage, satinage

Ces opérations sont destinées à éliminer les imperfections géométriques et à maîtriser l'aspect de la surface. Celle-ci sera aplanie par abrasion, par écrasement des parties saillantes, par dissolution chimique ou électrochimique.

d) Dégazage

Les métaux peuvent retenir des gaz aussi bien par adsorption superficielle que par dissolution dans leur masse. Ces gaz sont susceptibles de se dégager lors d'un traitement ou à tout autre moment entraînant le décollement du revêtement. Les dégazages se font par étuvage, la température et la durée dépendant du matériau.

e) Lavage, rinçage, égouttage, séchage

Les lavages éliminent les éléments solubles ou les particules peu adhérentes de la surface. Après un traitement en phase liquide, les rinçages arrêtent la réaction et évitent le transfert de matière dans les étapes suivantes. Le séchage s'effectue le plus souvent à chaud.

I.2.3.2 Activation de la surface

Une surface propre est une condition nécessaire mais pas suffisante pour obtenir une bonne adhérence d'un dépôt à un substrat. Parfois, la surface du substrat est activée pour obtenir ou améliorer l'adhérence du dépôt.

Les substrats pour les dépôts de projection thermique sont surtout activés par sablage [10]. Les nouvelles techniques d'activations sont :

- Le traitement par jet d'eau.
- Le traitement par chocs laser.

Le sablage consiste à accélérer les particules d'un matériau dur (corindon, acier dur, silice, carbure de silicium) dans un jet d'air comprimé. Les particules ont généralement des formes angulaires et parfois sphériques. Elles bombardent la surface d'un substrat en la rendant rugueuse.

I.3 Multimatériau et dépôt

Un regroupement de deux ou plusieurs classes de matériaux souvent sous forme de couches sur un métal de base donne naissance à ce qu'on appelle « multimatériau ».

I.3.1 Les revêtements par projection thermique

Actuellement, on peut distinguer trois grands types de revêtements protecteurs qui permettent de résoudre partiellement les problèmes de tenue des pièces en service [12].

I.3.1.1 Revêtement monocouche

Le revêtement se compose d'une seule couche projetée directement sur le substrat (figure I-9.a)). Il est préférable que les coefficients de dilatation thermique du dépôt et du substrat soient les plus proches possibles, sauf si une énergie d'adhésion est suffisamment forte pour assurer la bonne tenue du dépôt.

I.3.1.2 Revêtement bicouche

Une couche supplémentaire est appliquée entre le dépôt et le substrat (figure I-9.b)). Cette couche supplémentaire est appelée sous couche d'accrochage qui a un coefficient de dilatation thermique intermédiaire par rapport à ceux du substrat et du dépôt. Elle est appliquée pour assurer une meilleure adhérence du dépôt au substrat.

I.3.1.3 Revêtement multicouche

Ce type de revêtement est composé de trois couches (une intermédiaire, une sous couche d'accrochage et le dépôt) (figure I-9.c)).

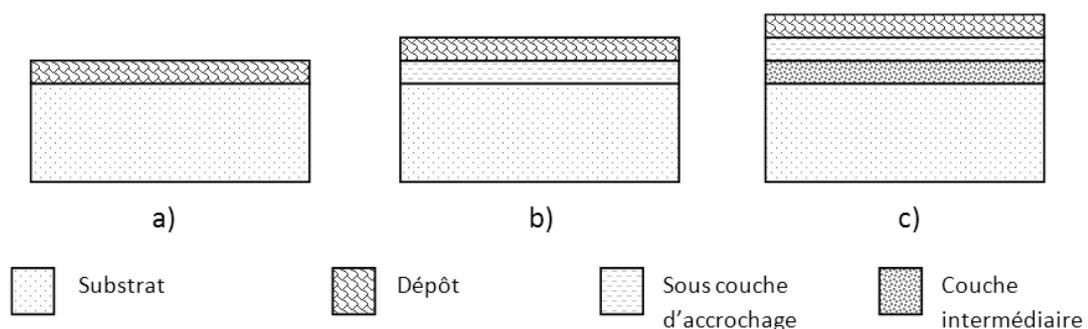


Figure I-9. Schéma représentant les différentes classes de revêtements.

I.3.2 Formation des dépôts par projection thermique

La formation du revêtement par projection thermique est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat ou sur des lamelles déjà solidifiées. Le revêtement ainsi réalisé présente une structure lamellaire comportant éventuellement des oxydes, des microporosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites (figure I-10). La structure lamellaire des dépôts est responsable de l'anisotropie des propriétés mécaniques [13]. La qualité des dépôts projetés dépend essentiellement de la morphologie des lamelles et de la nature du contact entre elles [13]. Une bonne compréhension des mécanismes gouvernant l'écrasement des particules est donc indispensable.

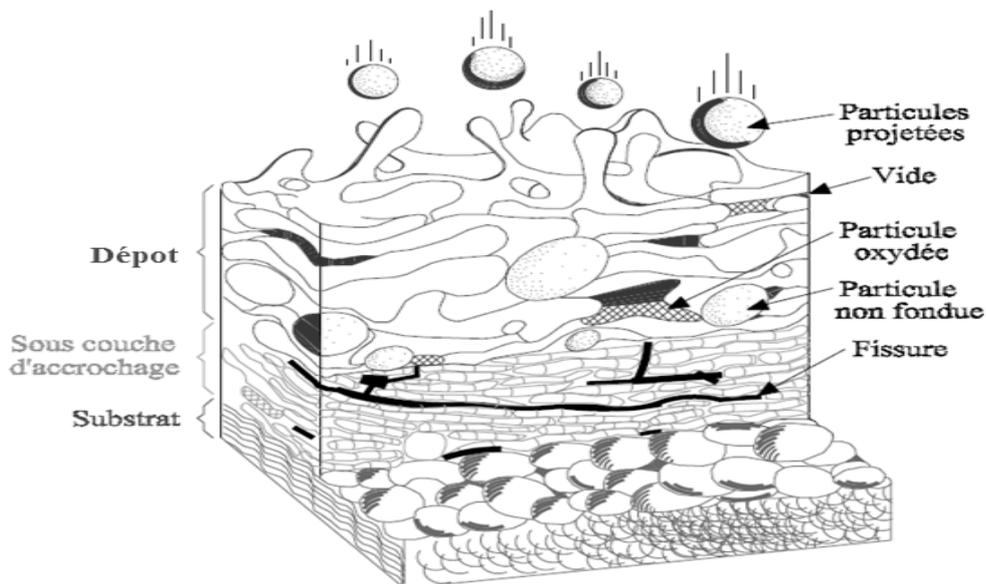


Figure I-10. Structure d'un dépôt réalisé par projection thermique [13].

I.3.3 Phénomènes au contact particule/substrat

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule (figure I-11). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement [14].

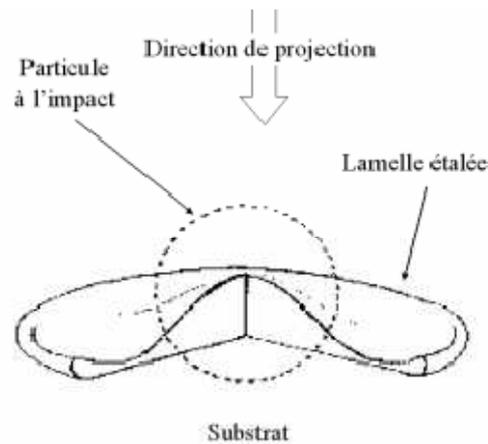


Figure I-11. Schéma d'écrasement d'une particule [14].

L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes: impact initial, étalement de la particule et enfin refroidissement et solidification [14].

I.3.3.1 L'impact initial

Les travaux de Kudinov et al. [15] aboutissent à un classement qualitatif d'une trentaine de morphologies différentes (figure I-12) de particules étalées en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact sur une surface lisse [16,17]. Une gouttelette totalement fondue s'étalerait correctement avec une vitesse faible (cas 1) et éclaterait au moment de l'impact sous l'action des forces de surface avec une vitesse élevée (cas 6). Ce phénomène étant appelé éclaboussure à l'étalement ou suivant l'appellation anglo-saxonne utilisée par la suite « flattening splashing ». Dans le cas d'une particule partiellement fondue, le noyau solide resterait piégé au centre de la lamelle (cas 30) ou serait éjecté conduisant à une lamelle de forme annulaire (cas 17). Cependant, les paramètres du substrat n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Escure et al. ont étudié l'impact des particules fondues d'alumine sur des substrats pour différentes températures et rugosités [16,17]. Ils montrent que l'étalement est moins bon sur une surface froide que sur une surface chaude et qu'une rugosité importante peut favoriser le flattening splashing. D'autres études montrent que le comportement des particules immédiatement après l'impact (quelques nanosecondes) peut être caractérisé par le facteur de Sommerfeld K , exprimé par l'équation I-1 :

$$K = We^{0,5} \cdot Re_p^{0,25} \quad \text{Equation I-1}$$

Où Re est le nombre de Reynolds de la particule (équation I-2),

$$Re = \frac{\rho_{\infty} v_p d_p}{\mu_{\infty}} \quad \text{Equation I-2}$$

Et We est le nombre de Weber (équation I-3),

$$We = \frac{\rho_p d_p v_p^2}{\sigma_p}$$

Equation I-3

σ_p étant la tension de surface liquide vapeur ($J.m^{-2}$)

A l'impact (une étape de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes) sur une surface lisse, il a été observé que l'éclaboussement d'impact (impact splashing) est observé systématiquement pour des valeurs du nombre de Sommerfeld supérieures à une valeur critique $30 < K_c < 60$. Ce qui est à comparer aux impacts de gouttelettes d'eau pour lesquels la valeur critique est $K_c = 58$ et celle que soit la température de la cible [16,17].

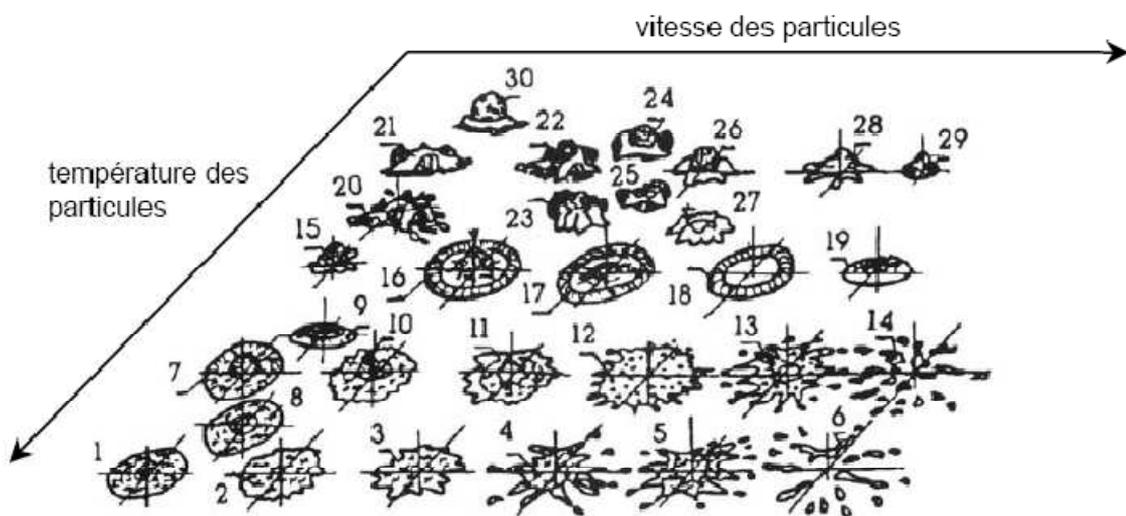


Figure I-12. Différentes morphologies de particules étalées en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact sur une surface lisse [16,17].

I.3.3.2 Déformation d'une particule

L'étalement des particules (de l'ordre de la microseconde) est un phénomène complexe notamment quand la solidification des lamelles commence avant l'étalement complet. Les phénomènes intervenants dans cette étape sont gouvernés par plusieurs facteurs qui peuvent être classés en 2 groupes : les propriétés des particules à l'impact (le diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l'état physico-chimique etc...) et l'état de la surface du substrat où des particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques, l'oxydation etc...) [18]. La particule qui s'écrase sur le substrat prend typiquement une des deux formes morphologiques (figure I-13), démontrées pour la première fois par Houden : crêpe et fleur [10].

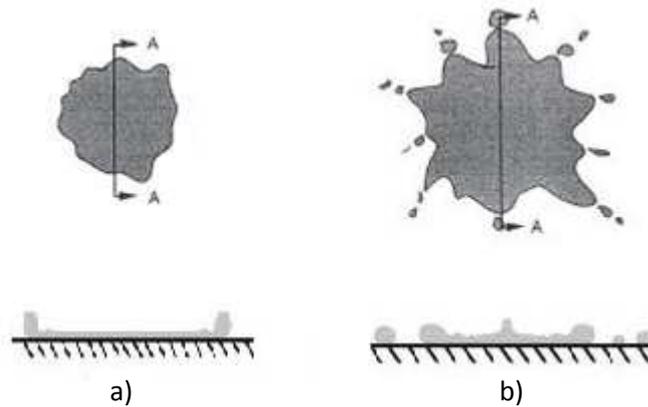


Figure I-13. Morphologie des lamelles a) crêpe b) fleur [10].

La formation d'une lamelle en forme de fleur résulte de l'écrasement de la particule qui a une vitesse et une enthalpie élevés. Il est probable, sous condition du bon choix des paramètres de projection, de rencontrer ces formes dans les dépôts obtenus par des procédés « énergétiques » tels que : APS, VPS ou D-gun. Dans le cas de l'utilisation d'une des techniques peu « énergétiques » telles que FS ou la projection par plasma, on obtient des lamelles en forme de crêpes [10].

L'écrasement des particules a été analysé théoriquement par Madejski (équation I-4). Le modèle de Madejski permet de trouver le paramètre ξ . Ce paramètre est une fonction du nombre Re , qui décrit l'état de la particule avant l'impact [10], et est égal à :

$$\xi = 1,29 \cdot Re^{0,2} \quad \text{Equation I-4}$$

L'épaisseur d'une lamelle peut être trouvée (équation I-5) à partir de son diamètre initial et du paramètre ξ [10] :

$$h_l = 2d_p / 3 \xi^2 \quad \text{Equation I-5}$$

I.3.3.3 Solidification et refroidissement d'une particule

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat [18]. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée [18]. Le contact effectif lamelle-substrat varie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Les paramètres intéressants pour ce phénomène sont :

- 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 du dépôt et du substrat ainsi que de la température initiale du substrat T_0 .
- Le temps de solidification t_{sol} . Ce temps dépend de la résistance thermique de contact et de l'épaisseur des lamelles h_l . Cette épaisseur dépend du procédé de projection.

Si l'on suppose que la particule est fondue à l'impacte, la température de contact T_c augmente quand :

- La température de fusion T_f du matériau des particules est élevée
- La conductivité thermique de la particule k_p et sa diffusivité thermique α_p sont petites.

Dans le cas d'une température de contact supérieure à la température de fusion du substrat, la particule s'incruste et l'adhérence du dépôt est très bonne [10]. Le temps de solidification t_{sol} s'allonge si l'épaisseur des lamelles h_l augmente. Inversement, ce temps est plus court quand la diffusivité thermique du substrat est grande car la chaleur est évacuée plus rapidement [10].

I.3.4 Caractéristiques du dépôt

I.3.4.1 Microstructure

Les particules fondues s'écrasent sur le substrat et forment de fines lamelles qui s'adaptent aux irrégularités de la surface. Le temps de solidification d'une particule projetée est de l'ordre de la microseconde à la dizaine de microsecondes [18]. Les caractéristiques de la microstructure dépendent, d'une part, des paramètres des particules à l'impact (vitesse, taille, état de fusion et état chimique) et d'autre part, des paramètres du substrat (matière, rugosité, état chimique de la surface et température) [18].

I.3.4.2 La porosité

La manière dont les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité.

Fondamentalement, trois paramètres principaux, la vitesse, la température et la taille des particules influencent la porosité. On peut distinguer trois types de porosités. La première est la porosité fermée avec des pores entièrement inclus dans le dépôt. La seconde est la porosité ouverte avec des pores qui présentent une « extrémité » fermée et une autre ouverte au niveau de la surface du dépôt ou de la surface de coupe. La troisième concerne les pores ou plutôt des fissures qui traversent le dépôt, de sa surface jusqu'au substrat [13].

I.3.4.3 Teneur en oxydes

L'inclusion d'oxydes dans les dépôts tend généralement à dégrader leurs propriétés : ils présentent des lamelles moins fortement liées, une composition chimique hétérogène et des contraintes internes résultant de la différence des coefficients de dilatation thermique entre oxydes et métaux. La fraction d'oxydes dans le dépôt est inversement proportionnelle au diamètre et à la vitesse des particules et directement proportionnelle à la température de surface des particules. Les phénomènes d'oxydation mis en jeu en projection thermique peuvent intervenir à différents stades du procédé [14] :

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

Pour limiter l'oxydation des lamelles métalliques, on peut utiliser les techniques à atmosphère inerte (SPS, IPS) ou à vide (VPS). Une autre méthode plus astucieuse, consiste à ajouter à la poudre un élément qui absorbe l'oxygène (par exemple Al). Ainsi, le dépôt de Ni projeté à l'air, a 3% masse d'oxygène, tandis que le dépôt projeté avec de la poudre de Ni+5% masse Al ne contient que 10⁻³% masse d'oxygène [10]. Les oxydes peuvent se former également par oxydation de la surface du substrat métallique. Pour les éviter, il faut projeter directement après l'activation du substrat (pas plus d'une demi-heure).

I.3.4.4 Dureté

La dureté est une propriété significative parce qu'elle donne une indication de la résistance à l'usure. Elle est affectée par la teneur en oxydes et la porosité du dépôt. La dureté des dépôts dépend donc de la nature du gaz de projection. L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt [14].

I.3.4.5 Adhérence

Il faut remarquer que les applications industrielles exigent généralement une bonne adhérence du dépôt au substrat ainsi qu'une bonne cohésion (adhérence entre les lamelles déposées). 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 (figure I-14). Les particules se transforment en lamelles qui serrent les pics en se solidifiant [19].

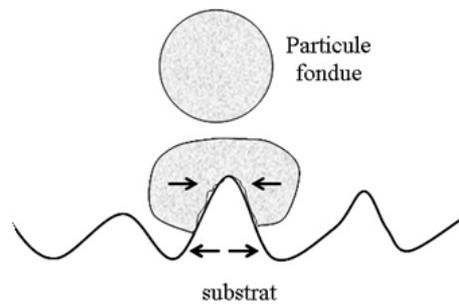


Figure I-14. Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de la surface [19].

L'adhérence d'un dépôt au substrat se réalise dans les endroits où les lamelles sont en contact avec le substrat. Or les lamelles ne sont en contact avec le substrat sur toute leur surface. L'aire de contact correspond à 20-30% de l'air total d'une lamelle [10]. Cet air est limité par les oxydes et les pores. À l'intérieur des zones de contact, l'adhérence résulte d'un des mécanismes d'interaction suivants :

- L'interaction physique par les forces de Van Der Waals. L'énergie de liaison est de 0,01-0,1 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 0,5 nm.
- L'interaction métallurgique qui se réalise par :
 - Diffusion réalisée par les lacunes présentes dans une lamelle en train de se solidifier. La diffusion ne peut avoir lieu que lorsqu'il y a une solubilité réciproque des matériaux des lamelles et du substrat. La diffusion est activée par la température de contact T_c et par le temps de solidification t_{sol} . T_c peut augmenter grâce à une réaction exothermique des éléments présents dans la lamelle. Un exemple bien connu est la réaction intermétallique entre le Ni et Al qui résulte en NiAl et Ni₃Al. La diffusion, étant dépendante du temps, elle peut être souvent négligée (une lamelle s'étale et se solidifie en quelques microsecondes).
 - Réaction chimique entre une lamelle et un substrat. Dans la pratique de la projection thermique, la réaction chimique de formation des composés intermétalliques n'a été observée que lors de la projection de métaux tels que Mo, W sur des substrats en acier.

I.4 L'aluminium et ses alliages

Avec 25 millions de tonnes de consommation mondiale annuelle, l'aluminium occupe la première place de la métallurgie des métaux non ferreux 1950 [6].

Le développement des applications de l'aluminium et de ses alliages s'expliquent par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisations:

- La légèreté
- La conductivité thermique
- La conductivité électrique
- La tenue à la corrosion

I.4.1 Généralité sur l'aluminium

Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié sont indiquées dans le tableau I-4 :

Tableau I-4. Les propriétés physiques de l'aluminium [9].

Propriété	Unité	Valeur	Remarque
Numéro atomique		13	
Masse volumique	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2698 *	
Point de fusion	$^{\circ}\text{C}$	660,45	sous $1013 \cdot 10^{-3}$ bar
Point d'ébullition	$^{\circ}\text{C}$	2056	sous $1013 \cdot 10^{-3}$ bar
Pression de vapeur	Pa	$3,7 \cdot 10^{-3}$	à 927°C
Énergie interne massique μ	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3,98 \cdot 10^5$	
Capacité thermique massique C_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	237	à 25°C
Coefficient de dilatation linéique α_l	$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	23,1	à 25°C
Résistivité électrique ρ	$10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	26,548	à 25°C
Susceptibilité magnétique K		$0,6 \cdot 10^{-3}$	à 25°C
Module d'élasticité longitudinal E	MPa	69 000	
Coefficient de poisson ν		0,33	
* c'est la masse volumique admise pour un métal de pureté comprise entre 99,65 et 99,99% A 700°C , la masse volumique du métal liquide de pureté 99,996 est $2357 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.			

Ce sont les éléments d'alliages qui déterminent les propriétés communes de base des alliages appartenant à la même famille. La métallurgie des alliages d'aluminium est basée sur six systèmes [20] :

- Aluminium-cuivre.
- Aluminium-manganèse
- Aluminium-silicium
- Aluminium-magnésium
- Aluminium-magnésium-silicium
- Aluminium-zinc (avec ou sans cuivre)

I.4.2 Familles d'alliages d'aluminium

Les produits en aluminium appartiennent tous à l'une des huit familles d'alliages (tableau I-5). Pour les alliages de corroyage, leur désignation numérique se fait à quatre chiffres, tandis que celle des alliages de moulages se fait à 5 chiffres, le premier chiffre correspondant systématiquement à la famille d'alliages [6,20].

Tableau I-5. Les familles d'alliages d'aluminium [6,20].

Élément d'alliage	Alliages de moulage	Alliages de corroyage
Aucun	10000	1000
Cuivre	20000	2000
Manganèse		3000
Silicium	40000	4000
Magnésium	50000	5000
Magnésium et silicium		6000
Zinc (et cuivre)	70000	7000
Autre éléments		8000

Il existe une famille encore non utilisée, c'est celle désignée par la famille 9000 [21].

I.4.3 Les alliages de corroyage

D'un point de vue métallurgique, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts tant par la gamme de fabrication que par certaines propriétés [6,21]. Ce sont :

- les alliages à durcissement par écrouissage
- les alliages à durcissement structurale

I.4.3.1 Les alliages à durcissement par écrouissage

Stricto sensu, tous les matériaux et alliages durcissent par écrouissage. Mais, dans la métallurgie de l'aluminium, cette désignation est réservée aux alliages des familles qui ne sont pas susceptibles de durcissement structural. Ils appartiennent aux familles 1000, 3000, 5000 et 8000. Leur gamme de fabrication est faite d'une suite de mises en forme à chaud et éventuellement à froid, associée à des recuits intermédiaires ou finaux.

I.4.3.2 Les alliages à durcissement structural

Ce sont ceux des familles 2000, 6000 et 7000.

Le durcissement structural des alliages d'aluminium est dû à des transformations métallurgiques à la suite des traitements thermiques de mise en solution de trempe et de revenu, aboutissant à la précipitation à l'intérieur des grains ou aux joints de grain de précipités de phase durcissant. Bien que, connu dans son principe depuis de très nombreuses années, le durcissement structural des alliages d'aluminium est toujours l'objet d'études métallurgiques [20].

I.4.4 Les alliages de moulage

On distingue les alliages :

- De première fusion, élaborées à partir d'aluminium primaire, issu de l'électrolyse.
- De seconde fusion, (appelés aussi alliages d'affinage). Ils sont élaborés par refusion des déchets récupérés. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication des pièces automobiles du groupe motopulseur.

Les alliages de moulage appartiennent aux familles 10000, 20000, 40000, 50000 et 70000. Les alliages au silicium sont les plus nombreux parmi les alliages de moulage. Ils représentent environ 60% du tonnage des pièces moulées [6].

I.4.5 Les alliages au silicium, famille 40000

Du fait de la facilité de mise en œuvre de ces alliages, l'eutectique est à 575°C. La fonderie de moulage d'aluminium est faite pour l'essentiel d'alliages au silicium [22]. Il y a deux catégories :

- Ceux qui contiennent du cuivre, utilisés exclusivement dans l'industrie automobile. Ces alliages n'ont pas une bonne tenue à la corrosion.

- Ceux qui ne contiennent pas de cuivre (exemple : 44100). Ces alliages ont beaucoup d'application en pièces de structure dans la mécanique, dans l'industrie électrique et aussi dans l'automobile. Ceux qui contiennent du magnésium sont des alliages à durcissement structural. Ces alliages ont une excellente résistance à la corrosion atmosphérique [20].

I.4.6 L'alliage 44100

L'alliage 44100 (A-S13), autrefois appelé alpax, est un alliage eutectique appartenant au système Al-Silicium (13% Si). Sa coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses.

Sur le diagramme d'équilibre Al-Si (figure I-15), on peut constater que la solidification commence par une cristallisation des cristaux primaires β (Si) et se termine par la cristallisation de l'eutectique $\alpha + \beta$ (Si) et éventuellement, avec d'autres phases formées par d'autres éléments. Les propriétés mécaniques de cette structure sont faibles [24].

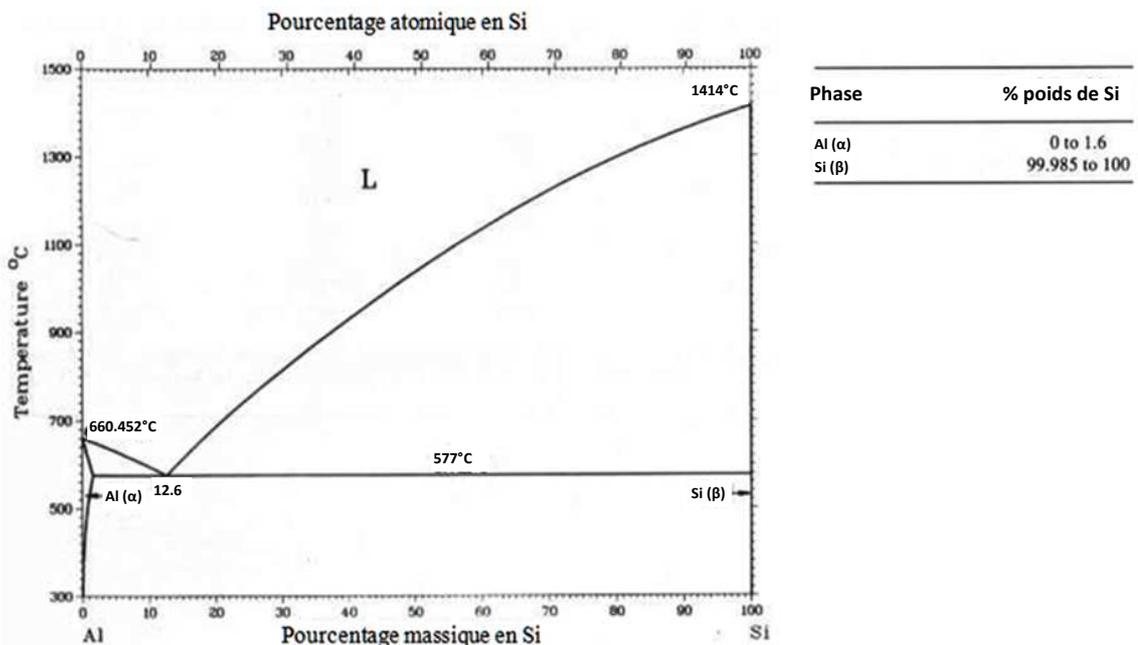


Figure I-15. Diagramme d'équilibre Aluminium-Silicium [23].

Plus près de l'alliage eutectique, se trouvent le plus souvent les cristaux primaires de silicium, c'est à dire, il y a accumulation (excès) de cristaux de silicium, qui ne sont pas fondus. Avec l'augmentation du chauffage du bain métallique ainsi que l'augmentation de la vitesse de refroidissement, on obtient une solidification normale de l'eutectique, c'est à dire une cristallisation couplé α (Al) + β (Si) est atteinte. Une telle cristallisation est obtenue aussi par le traitement du bain métallique en ajoutant du sodium. Il s'agit de l'affinage de la structure et l'élimination des cristaux de silicium en excès. L'alliage est inoculé au sodium (0,05 à 0,08%), par addition au bain de sels

contenant 67 % NaF et 33 % NaCl. La quantité de sodium exigée pour la coulée en sable est importante par rapport à celle exigée dans la coulée en coquille, car la solidification rapide dans la coquille donne une cristallisation eutectique. En présence du sodium, les lignes du diagramme d'équilibre se déplacent et l'alliage hypereutectique devient hypoeutectique [24]. Dans ce cas au lieu du silicium excédentaire, on observe dans la structure de l'alliage, l'apparition de cristaux de la solution α (Al) comme le montre les figures I-16 et I-17.

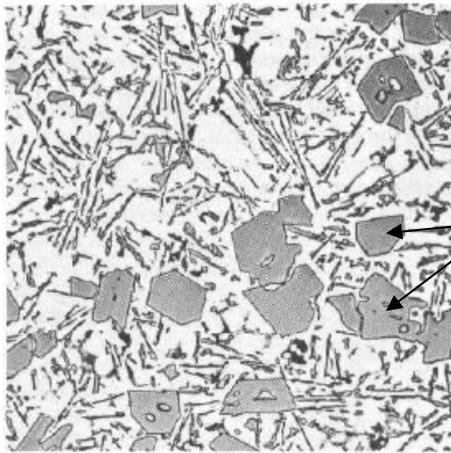


Figure I-16. Avant modification [25].



Figure I-17. Après modification [25].

Cette structure plus fine se traduit par une amélioration des propriétés mécaniques de l'alliage (figure I-18).

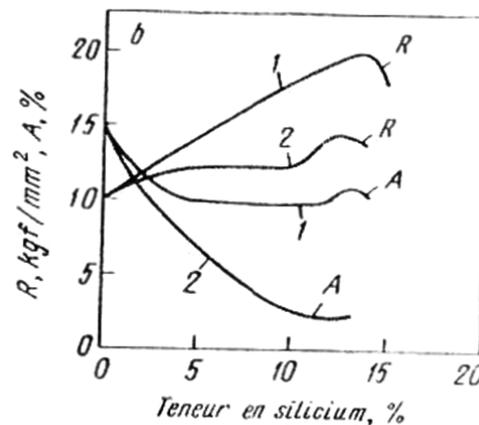


Figure I-18. Propriétés mécaniques 1) modifiées 2) non modifiées [24].

Chapitre II
Techniques expérimentales.



Pour concevoir ou construire de nouveaux objets technologiques, tout ingénieur a besoin d'utiliser des matériaux. Et l'utilisation intelligente, rationnelle et raisonnée de ces matériaux par un ingénieur concepteur ou constructeur nécessite une bonne connaissance initiale de leurs propriétés d'usage. Donc connaître un matériau, c'est connaître ses propriétés d'usages. Pour se faire, l'ingénieur est porté à utiliser des techniques d'analyses et de caractérisations, qui doivent être choisies en fonction du matériau.

Ainsi, c'est dans cet état d'esprit qu'on a consacré cette partie à l'étude expérimentale des dépôts élaborés.

Donc, notre travail ci-dessous consiste à présenter la nature des matériaux de l'étude, le dispositif de projection thermique ainsi que l'ensemble des techniques d'analyses et de caractérisations des dépôts réalisés dans des conditions définies.

II.1 Le substrat

Le substrat, sujet de notre étude est un alliage d'aluminium du système Al-Si et appartenant à la famille d'alliages 40000 (alliages de fonderie). Selon la nouvelle désignation numérique [6], cet alliage est catalogué comme étant le 44100 (A-S 13 selon l'ancienne désignation) autrefois appelé aussi Alpax. Sa composition chimique (tableau II-1) ainsi que ses caractéristiques mécaniques (tableau II-2) nous ont été délivrée par la société nationale des véhicules industriels (S.N.V.I.).

Tableau II-1. Composition chimique de l'alliage 44100 (A-S13) [26].

Eléments	Si	Fe	Mn	Ti	Zn	Cu	Co	Mg	Pb	Ni	Sn
Composition (% masse)	11-13,5	0,70	0,30	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05

Tableau II-2. Caractéristiques mécaniques de l'alliage 44100 (A-S13) [27].

Etat	R (kgf/mm ²)	R _t (kgf/mm ²)	A %	HB
44100 (A-S13)	18	8	5	60

Les échantillons pour la projection thermique ont été obtenus à partir de pièces coulées en coquille.

II.1.1 Elaboration des pièces de fonderie

Comme on a assisté au déroulement du procédé de fabrication des pièces de fonderie, dont la pièce mère de nos échantillons au niveau de la fonderie d'aluminium de la société nationale des véhicules industriels (S.N.V.I.). Nous présentons les étapes fondamentales du processus de fonderie ainsi suivi.

II.1.1.1. La fusion

Elle se fait dans un four à gaz d'une capacité atteignant les 350 kg (figure II-1). Le four est d'abord chauffé à 720°C avant d'incorporer la charge métallique par masse de 100 kg composée de 50% charge neuve et 50% retour de fonderie jusqu'à atteindre la capacité maximale du four soit 300 kg. La charge neuve est sous forme de lingots de 7 kg (figure II-2).

Par la suite, le bain métallique subi une série de traitements dont le but est d'améliorer la qualité du produit final. Ces traitements consistent à introduire des produits agissants sur le métal fondu, et ceci comme suit :

- Protection du bain : on incorporant une poudre désignée par « Alu flux B » avec des doses de 0,2 à 0,4% du poids de métal à traiter soit 200 à 400g par 100kg [28].
- Désoxydation du bain : par un produit désoxydant « COVERAL EP 9773 » avec des quantités comprises entre 0,25 et 0,5% du poids de la charge à traiter [29].
- Affinage du bain : une poudre à base d'un mélange de sels de sodium (chlorures et fluorures) est injectée à raison de 0,5 à 1% de la masse total. Ce traitement a pour but de diminuer la taille des cristaux (affinage de la structure) qui se traduit par une amélioration des caractéristiques mécaniques [30].



Figure II-1. Fours de fusion (S.N.V.I.).

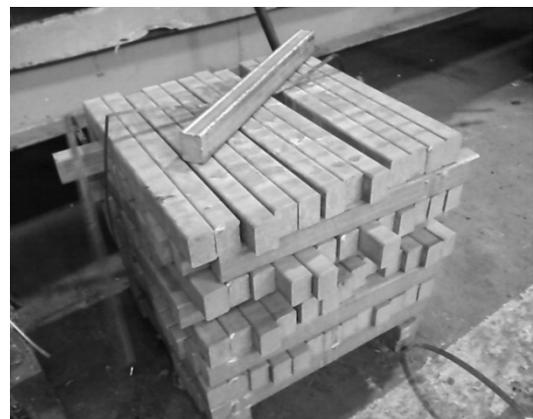


Figure II-2. Lingots A-S13 de 7kg.

Le métal fondu ayant subi les différents traitements, est prêt à être dirigé vers les différentes lignes de productions. Des poches préalablement chauffées seront utilisées pour son transport, au cours duquel il sera à nouveau inoculé de la poudre « Alu flux B » pour éviter tout réoxydation. Le métal en fusion sera déversé dans un four de maintien porté à une température de 800°C avant d'être finalement moulé.

II.1.1.2. Le moulage

Les pièces concernées par notre étude sont réalisées par le procédé de moulage en coquille. Elles auront ainsi des propriétés mécaniques meilleures que celles obtenus par moulage en sable [24]. Le moulage en coquille se fait dans les conditions suivantes :

- Le moule est préchauffé à 200°C en vue d'application de poteyage (figure II-3).
- Un premier poteyage « AQUAGEL 87 » à base de silicate de soude est pulvérisé sur la face de l'empreinte et de l'outil pour les protéger de l'attaque du métal liquide [31].
- Un autre poteyage « DYCOLTE 34 » est utilisé sur le précédent pour faciliter le remplissage de l'empreinte et éviter les malvenues et les reprises [32].
- L'outillage « moule » par la suite, sera chauffé jusqu'à une température allant de 300 à 350°C [33].
- Dé que la température d'opération est atteinte, le moulage peut commencer.

La productivité du procédé de moulage en coquille est grande. Car la coulée, la solidification et l'extraction des pièces (figure II-4) se font en une trentaine de second seulement.



Figure II-3. Poteyage de l'outil.



Figure II-4. Pièce finale obtenue.

II.1.2 Préparation des échantillons pour la projection thermique

Après la réalisation des pièces en fonderie, celles-ci ont subi une série d'opérations (ébarbage, découpe, meulage et polissage) afin de répondre aux dimensions nécessaires à la réussite des dépôts obtenus par projection thermique.

II.1.2.1. Forme et dimensions

Les échantillons sont tirés des pièces illustrés dans la figure II-4 précédente. Ils ont une forme rectangulaire de 5mm d'épaisseur (figure II-5).

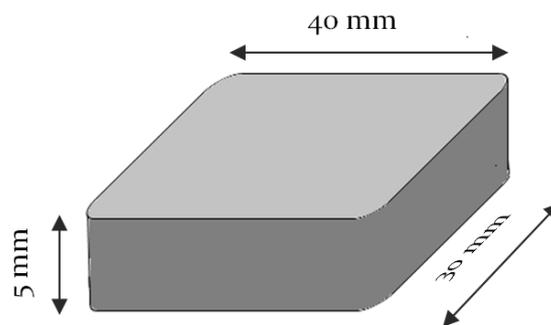


Figure II-5. Forme et dimensions des échantillons.

Les angles aigus ont été arrondis par meulage (figure II-6) pour éviter le détachement de la couche déposée par projection thermique dû à la concentration local de contraintes résiduelles [10].

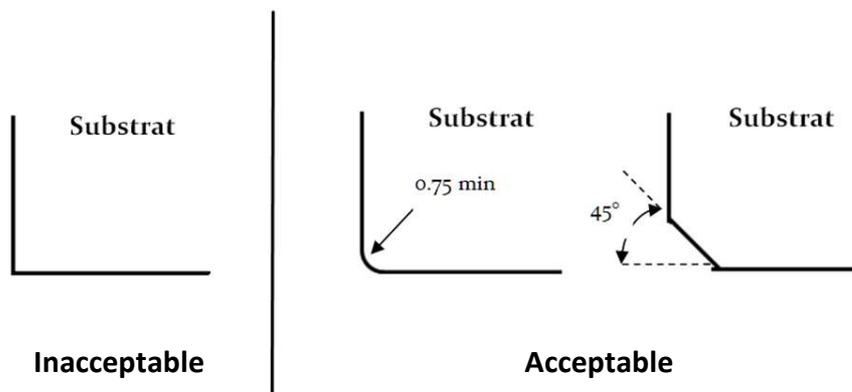


Figure II-6. Angles arrondis par meulage [10].

II.1.2.2. Le polissage

Un polissage grossier avec des papiers abrasifs de faibles granulométries (120 et 180) est nécessaire pour avoir une bonne planéité des surfaces à revêtir.

II.1.2.3. Le nettoyage

La surface du substrat a subit un brossage mécanique dans une solution dégraissante d'acétone ensuite rincée, séchée par un flux d'air chaud et enroulée dans du papier pour éviter au maximum l'oxydation des échantillons avant l'activation par sablage.

II.1.2.4. L'activation

L'activation des surfaces à revêtir se fait par sablage. A l'aide d'une sableuse à surpression (figure II-7). Les substrats fixés sur un porte-échantillons sont bombardés par des particules de type corindon (alumine) d'une granulométrie moyenne et de forme angulaire, créant ainsi un profil de rugosité. Le sablage se fait perpendiculairement aux substrats pendant 2 minutes (figure II-8).

Ainsi les surfaces activées, sont nettoyées une nouvelle fois par l'acétone et séchées avant d'être prêt à recevoir le revêtement.



Figure II-7. Chambre de sablage avec sableuse à surpression.



Figure II-8. L'opération de sablage.

II.2 La projection thermique

Les travaux expérimentaux relatifs à la technique de projection thermique ont été réalisés à l'entreprise «ALGERIE METALLISATION», entreprise privée spécialisée dans la maintenance et la récupération par métallisation des pièces mécaniques usées.

Le procédé utilisé est celui de la projection thermique à l'arc entre deux fils. Ce procédé est réputé d'avoir un excellent apport qualité/prix ainsi qu'une simplicité et une productivité des plus extraordinaires.

II.2.1 Equipement de projection

Un poste de projection thermique se compose d'un générateur de courant continu, d'une source d'air comprimé, un pistolet de projection et de fils pour projection ainsi que leurs accessoires (gaine pour fils de projection, fils de conduction électrique...) (figure II-9).



Le pistolet utilisé est un modèle THRMO-SPRAY 234 d'un poids relativement faible ce qui facilite sa manipulation donnant ainsi des dépôts de qualité même pour les pièces les plus complexes.

Les fils sont conditionnés en bobines et sont tirés, au travers de gaines souples par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des turbines à air.

À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes contact permettant, d'une part, le positionnement du fil avant entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils.

L'application du courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les fondre (température d'environ 3 000 °C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce au jet d'air comprimé et projetés sur le substrat.

La figure II-10 représente le mécanisme de fonctionnement du pistolet à projection thermique THRMO-SPRAY 234 à arc entre deux fils.

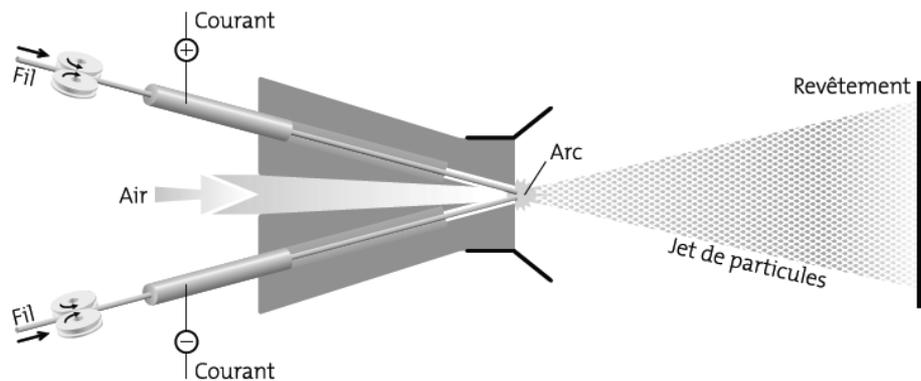


Figure II-10. Principe de fonctionnement du pistolet THRMO-SPRAY 234 [35].

- Les fils fourrés

Il existe deux types de fils pour la projection thermique par arc-fil :

- Pour les métaux purs ou certains alliages ductiles, on utilise des fils «pleins», uniquement constitués du matériau à déposer [13].
- Pour des alliages plus complexes ou des composites, on peut utiliser des fils «fourrés» constitués d'une enveloppe métallique ductile électriquement conductrice à l'intérieur de laquelle est introduite une poudre.

Ce type de fil est utilisé depuis 1980 pour la réalisation de dépôts présentant une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure.

II.2.2 Paramètres et conditions de projection thermique

Comme exposé dans le chapitre I, la qualité des dépôts dépend des conditions de contact substrat/particules projetées (T_0 , T_f , T_c , t_{sol} ...). Or celles-ci sont influencées par les paramètres de projection. Certains de ces paramètres sont propres au procédé de fabrication et qui sont recommandés par le constructeur pour un bon fonctionnement de l'outil. D'autres sont guidés par des choix relatifs à l'étude considérée.

Les paramètres opératoires relevés du site de projection et relatifs au procédé arc à deux fils utilisé sont comme montré sur le tableau II-3.

Tableau II-3. Paramètres du procédé arc à deux fils selon «ALGERIE METALLISATION».

Pression d'air dans le moteur	3,8 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0,064 m/s
Tension du générateur	30 V
Intensité du courant	100 A

Les autres paramètres qui influencent la qualité des dépôts réalisés par projection thermique et/ou pris en considération par notre étude réalisée figures dans le tableau II-4.

Tableau II-4. Autres paramètres de projection.

Distance de projection	140 mm
Angle de tir	90°
Flux pulvérisateur	Air comprimé
Temps de projection	4, 8, 12 et 16 s
Matériaux projetés	Mo, Acier inox 55 E (Thermanit).

Les dépôts ainsi réalisés sont à différentes épaisseurs, en Molybdène ou en inoxydable (55 E) avec ou sans couche d'accrochage.

II.2.3 Matériaux utilisés pour la réalisation des dépôts

Les matériaux utilisés dans la réalisation des revêtements sur notre alliage d'aluminium sont, le Molybdène et un acier inoxydable désigné par 55 E (Thermanit) dont sa composition est illustrée dans le tableau II-5.

Tableau II-5. Composition de l'acier inoxydable 55 E (Thermanit) [34].

Eléments	C	Fe	Ni	Cr	Mn
Concentrations (% en masse)	0,132	66,6	5,5	18,5	8,1

- Sous couche d'accrochage

Pouvant être considérée comme étant une préparation de surface avant revêtement, la projection d'une sous couche d'accrochage est souvent nécessaire pour obtenir une bonne adhérence du dépôt final. Nous avons réalisé cette sous couche par la projection pendant 2 secondes d'un alliage Ni-Al désigné par la nuance 75 E [35].

La forme finale de nos échantillons après projection est schématisée dans la figure II-11.

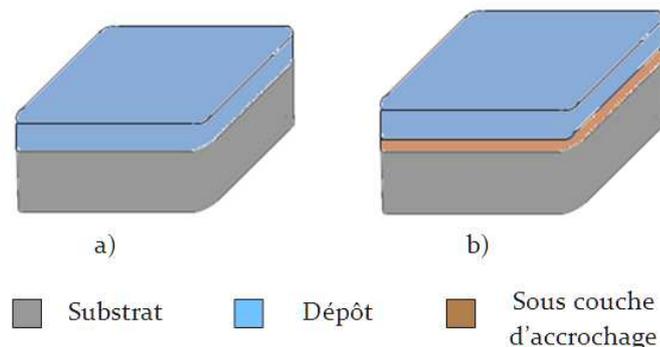


Figure II-11. Forme des échantillons revêtus : a) sans couche d'accrochage b) avec couche d'accrochage.

Ces matériaux de projection sont durs et résistants (figure II-12). Ce choix a été fait en raison des faibles caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 44100 (A-S13) et en vue d'augmenter sa résistance à l'usure.

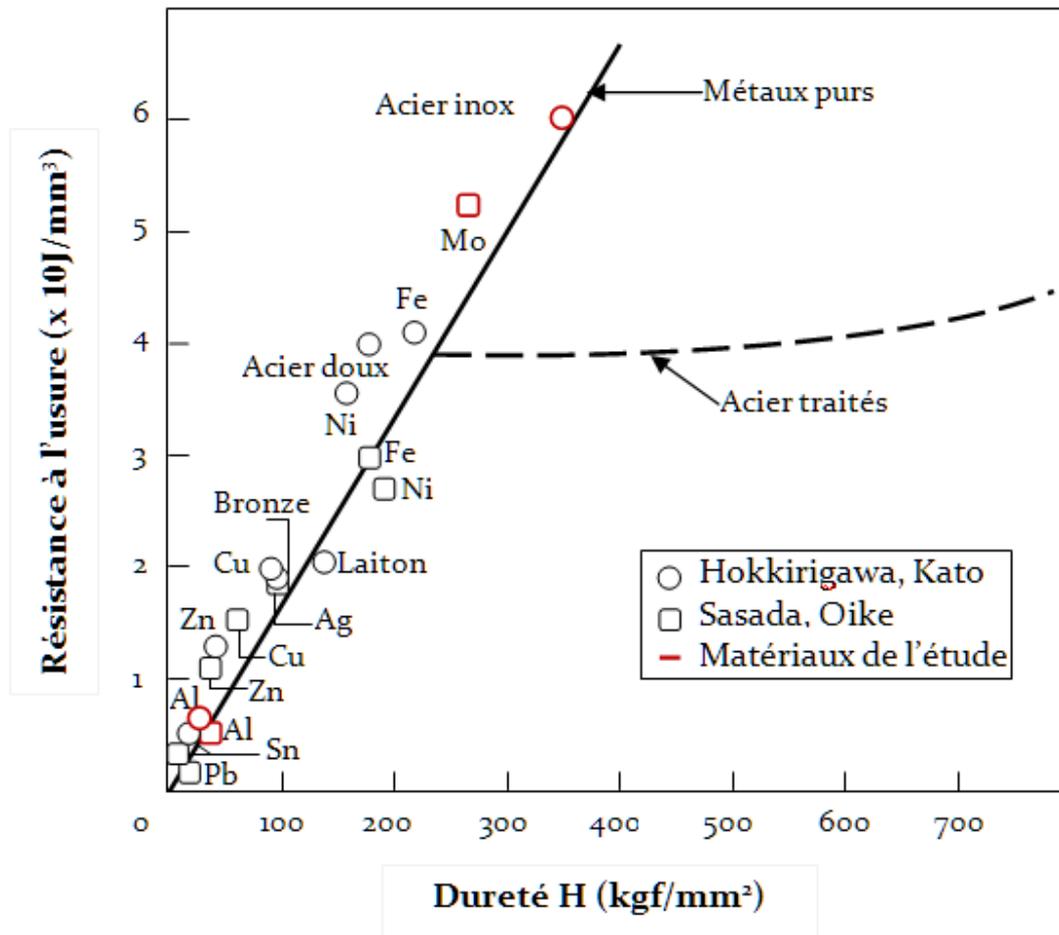


Figure II-12. Estimation de la résistance à l'usure (selon K. Kato) [36].

- L'usure

Malkin et Joseph [36] ont montré que le travail nécessaire pour produire un volume de copeau unité dans un processus de coupe (usure) est approximativement égal à l'énergie de fusion du matériau de ce copeau (figure II-13). L'énergie de fusion E_f est (équation II-1):

$$E_f = C_p \cdot \Delta\theta + H_f \quad \text{Equation II-1}$$

Où H_f est l'enthalpie de fusion et C_p la capacité calorifique.

Le tableau II-6 donne les valeurs de l'énergie de fusion de quelques matériaux.

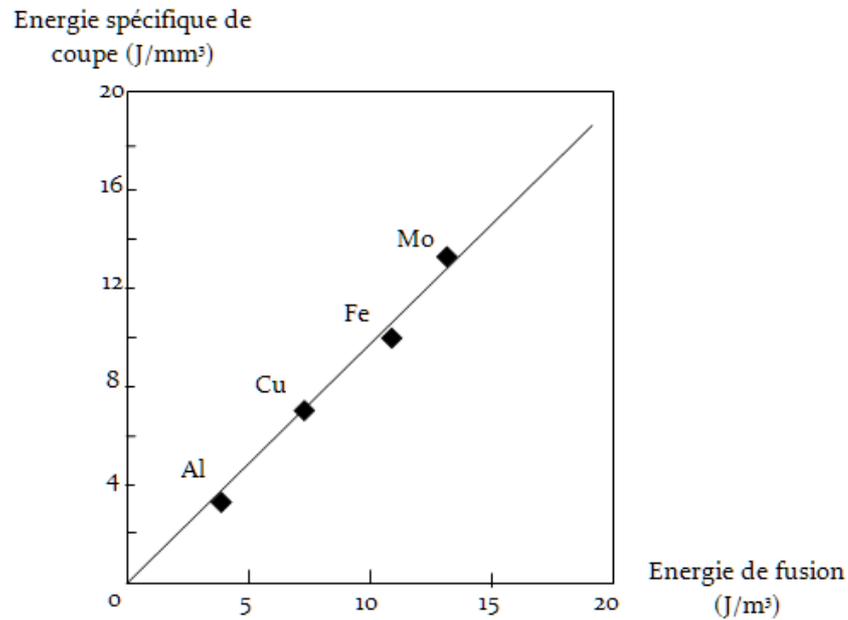


Figure II-13. Energie spécifique de coupe et énergie de fusion (d'après Malkin et Joseph) [36].

Tableau II-6. Valeurs de l'énergie de fusion de quelques métaux [36].

	Al	Cu	Fe	Mo
C_p J/g K	0,897	0,385	0,449	0,251
θ_f	658	1083	1530	2622
$C_p (\theta_f - \theta_a)$	590	416	687	658
H_f J/g	397	207	247	417
E_f J/g	987	623	934	1075
E_f J/mm ³	2,7	5,6	7,37	11,0

Les expériences ont indiqué que l'énergie spécifique de coupe est proportionnelle à la dureté des matériaux (sauf dans le cas des aciers traités), et la dureté des métaux purs est liée à leur température de fusion et donc à leur énergie de fusion [36].

II.2.4 Caractérisation des dépôts

Elle regroupe l'ensemble des méthodes d'analyses microstructurales et de caractérisations des propriétés mécaniques.

II.2.4.1. Analyse microstructurale

L'analyse microstructurale se fait à l'aide d'un microscope métallographique « OLYMPUS BX51M ». Ce microscope optique permet une observation des échantillons avec un grossissement variant de 50 à 1000. Il est équipé de caméra numérique « SONY » et utilise un logiciel de traitement d'images « ARCHIMED ».

Une préparation des échantillons avant l'observation microscopique est nécessaire. Elle consiste en un polissage fin des coupes longitudinales des dépôts. Les étapes suivies pour un polissage parfait des échantillons sont :

- L'enrobage à froid des échantillons sélectionnés.
- Le polissage de la surface des échantillons :
 - Initialement avec des papiers abrasifs revêtus de carbure de silicium (SiC) de granulométries différentes (400 à 1000).
 - La finition est réalisée par un polissage sur meule de drap arrosée d'alumine (de particules de taille 3 μ m) en suspension dans l'eau.
- Enfin, les échantillons sont rincés, nettoyés à l'acétone puis séchés par un flux d'air chaud.

L'observation d'une section métallographique permet de mettre en évidence :

- L'épaisseur du dépôt réalisé.
- La porosité et la distribution de la taille de pores.
- La taille de particules non fondues et leur distribution.
- La déformation thermique ou mécanique du substrat à l'interface avec le dépôt.
- La présence de grains réduits ou oxydés.

Le logiciel « ARCHIMED » permet de procéder à une analyse des images prises au cours de l'observation microscopique afin d'en tirer des informations notamment sur l'épaisseur et la porosité des dépôts.

a) L'épaisseur

La mesure de l'épaisseur d'un dépôt se fait sur le plan de la section orthogonale au revêtement (coupe micrographique). Elle résulte d'une moyenne arithmétique de 10 mesures régulièrement espacés sur une longueur de 1 à 2 cm [37].

b) La porosité

Les méthodes basées sur l'observation de coupes permettent de quantifier un taux global de porosité mais aussi d'observer des objets fins comme des fissures et des porosités inter-lamellaires. Nous avons utilisé la méthode de grillage pour déterminer le taux de porosité présent dans les couches de revêtements.

II.2.4.2. Caractérisation des propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques permettent de prédire la résistance et le comportement des dépôts en contact avec des surfaces différentes.

La particularité des dépôts réalisés par projection thermique réside dans le faible rapport de leur épaisseur à leur surface. C'est pourquoi il est difficile d'utiliser les tests développés pour les matériaux massifs. Les tests utilisés se basent sur quelques principes simples (tableau II-7).

Tableau II-7. Tests des propriétés mécaniques des dépôts [10].

Test	Propriétés mécaniques
Indentation	Dureté Micro-dureté Adhérence Ténacité Module d'élasticité Résistance mécanique
Test de rayure	Adhérence
Test de traction	Adhérence Module d'élasticité Ténacité
Déformation de surface (<i>bulge test</i>)	Module d'élasticité Résistance mécanique
Déformation du barreau	Module d'élasticité Résistance mécanique

La microdureté

Le test de la microdureté est très souvent utilisé, il est basé sur le principe de la pénétration du diamant (pénétrateur) dans une surface. Le diamant a une forme pyramide, dont sa base est carré (test de Vickers). Les indentations sont faites dans la section longitudinale de la couche projetée ainsi que celle du substrat (figure II-14).

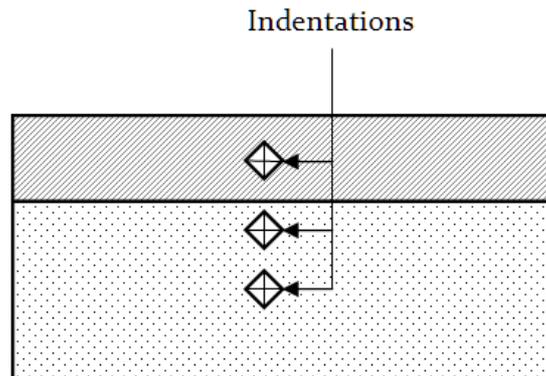


Figure II-14. Test d'indentation (microdureté).

On pratique trois indentations à faible charges (100 grf), une sur le dépôt, sur le substrat et une dernière au voisinage de l'interface dépôt/substrat. Ceci permet de mesurer la variation de la microdureté et ainsi avoir une idée sur les variations possible de la structure et composition chimique du substrat.

Chapitre III
Résultats et interprétations.

Comme décrit dans le chapitre précédent (étude expérimentale), nous allons procéder dans cette partie à l'analyse des résultats obtenus en vue de caractériser les dépôts réalisés sur l'alliage d'aluminium 44100 (A-S13) et connaître les comportements de ces revêtements aux sollicitations externes éventuelles en nous intéressant à l'interface et à l'épaisseur du dépôt par métallographie et filiation de microdureté.

III.1 Caractérisation du substrat

III.1.1 Microstructure

Comme exposé précédemment, notre alliage 44100 (A-S13) présente une microstructure de type eutectique α +Si composée de lamelles de silicium (Si) baignant dans une matrice α . Cet alliage a été traité par addition de produits à base de sodium qui explique l'apparition des dendrites d'aluminium α et la diminution voir disparition des cristaux primaires de silicium [24]. La figure III-1 représente la microstructure de l'alliage d'aluminium 4410 (A-S13) à différents grossissements.

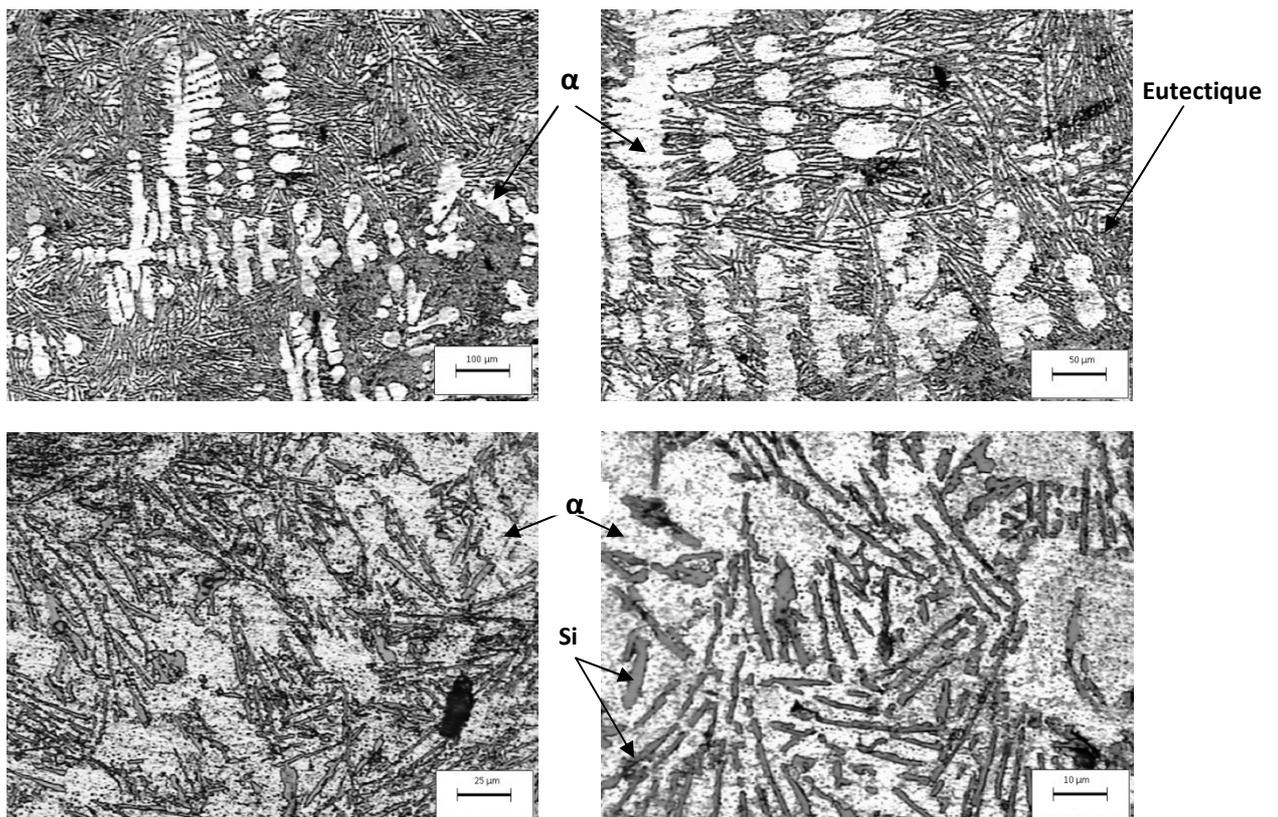


Figure III-1. Microstructure de l'alliage 44100 (A-S13).

III.1.2 La microdureté

La valeur de la microdureté enregistrée sur l'eutectique est de $71 \text{ HV}_{100 \text{ grf}}$ sur la base de dix mesures (figure III-2).

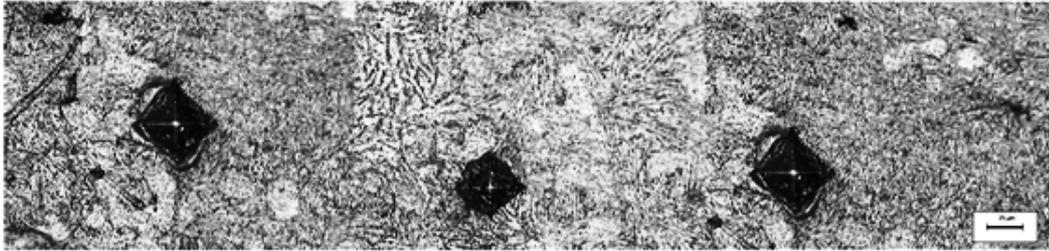


Figure III-2. Test d'indentation (microdureté $\text{HV}_{100 \text{ grf}}$).

III.1.3 La rugosité

Le sablage de la surface du substrat à revêtir crée un profil de rugosité (figure III-3). On a procédé au tracé du profilogramme par analyse d'image. Les valeurs ainsi obtenues résultent d'une collecte de 100 mesures tout au long d'une distance de 2cm soit à $200 \mu\text{m}$ d'intervalle (figure III-4).

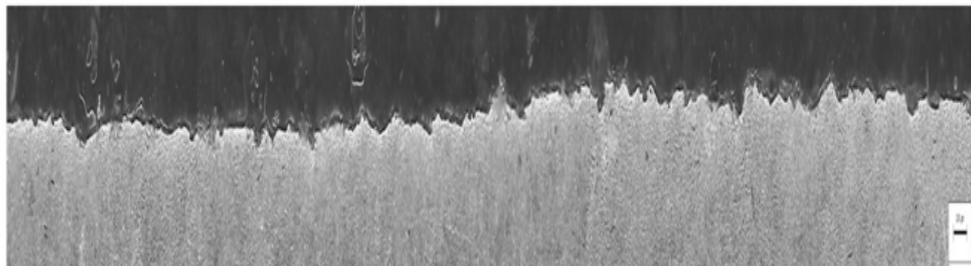


Figure III-3. État de surface du substrat après sablage sur une distance de 2cm.

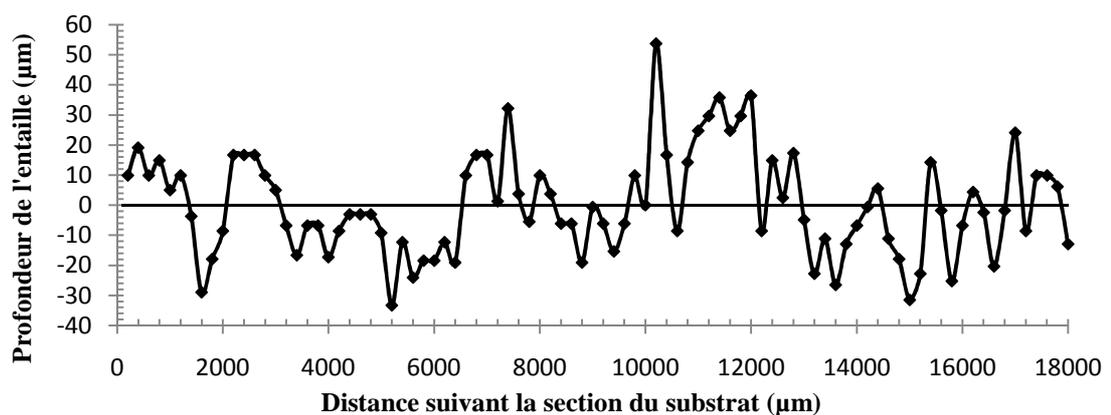


Figure III-4. Profil de rugosité du substrat après sablage.

On remarque que le substrat présente une rugosité assez élevée ($R_a \approx 20 \mu\text{m}$). Ceci est dû à l'utilisation de particules de sablage (corindon) à diamètre élevé.

III.2 Caractérisation des dépôts

III.2.1 La microstructure

Une première observation au microscope optique nous fournit déjà des informations importantes sur les dépôts réalisés (structure, présence d'oxydes, porosités, rugosité, adhérence...). La figure III-5 représente une micrographie de dépôt en acier inoxydable 55 E et en molybdène.

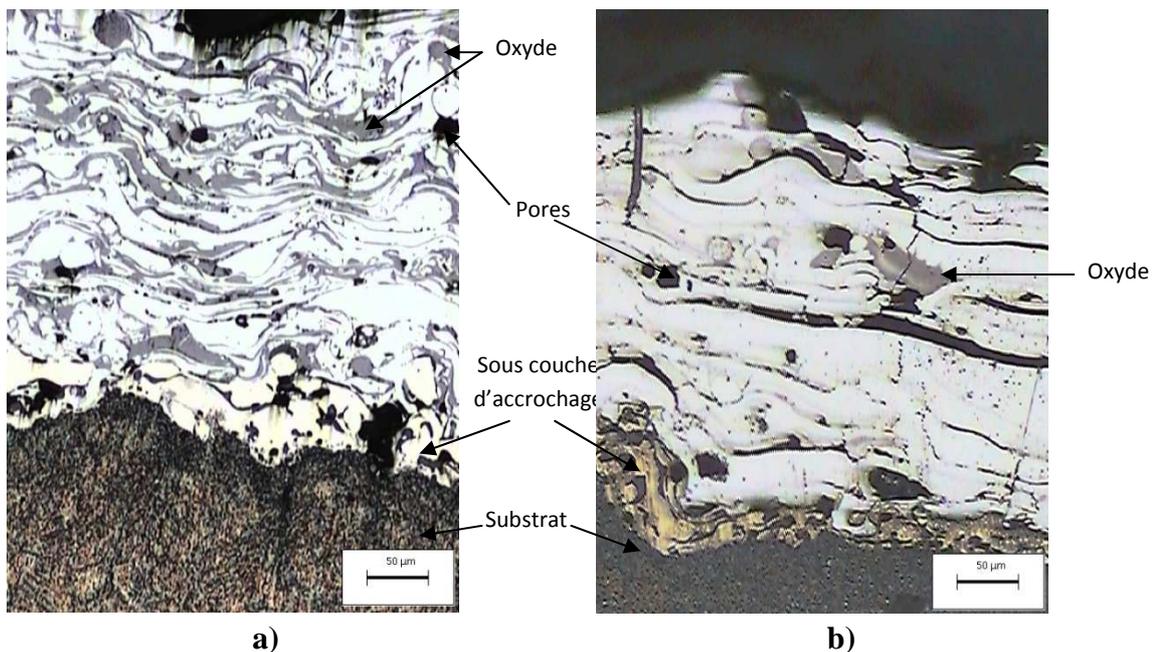


Figure III-5. Construction de dépôt réalisé par projection thermique
a) acier inoxydable 55 E **b)** molybdène.

Ces dépôts présentent une microstructure constituée de lamelles (splat) empilées dont les tailles varient selon le matériau projeté. On remarque ainsi que la taille des lamelles de l'acier inoxydable 55 E ($9\ \mu\text{m}$) est plus petite que celle des lamelles de molybdène ($22\ \mu\text{m}$) pour les mêmes paramètres de projection. Ceci est dû à la température de fusion des deux matériaux utilisés (1538°C pour l'inox 55 E et 2622°C pour le Mo).

La température de fusion détermine la vitesse à laquelle se solidifient les particules projetées avant leur impact sur le substrat (solidification moins rapide pour l'inox 55 E que pour le Mo). De plus, une grande surfusion tend à diminuer la viscosité, donc à favoriser l'aplatissement des particules [13]. Cela produit des lamelles d'acier inoxydable 55 E plus aplaties, donc moins épaisses contrairement à celles en Mo.

III.2.2 Epaisseur des dépôts

Les dépôts réalisés en acier inoxydable 55 E (Thermanit) et en molybdène ont des épaisseurs différentes suivant la durée de projection de 4, 8, 12 et 16 secondes. Les valeurs obtenues ont été tirées d'une série de 10 images avec 10 mesures sur chacune, soit 100 valeurs enregistrées pour chaque échantillon selon la coupe transversale du dépôt. Les profils d'épaisseur des dépôts, de la rugosité du substrat et de la surface du dépôt sont en majeure partie en annexe. La figure III-6 représente un exemple de profil d'épaisseur, de la rugosité du substrat et de la surface du dépôt.

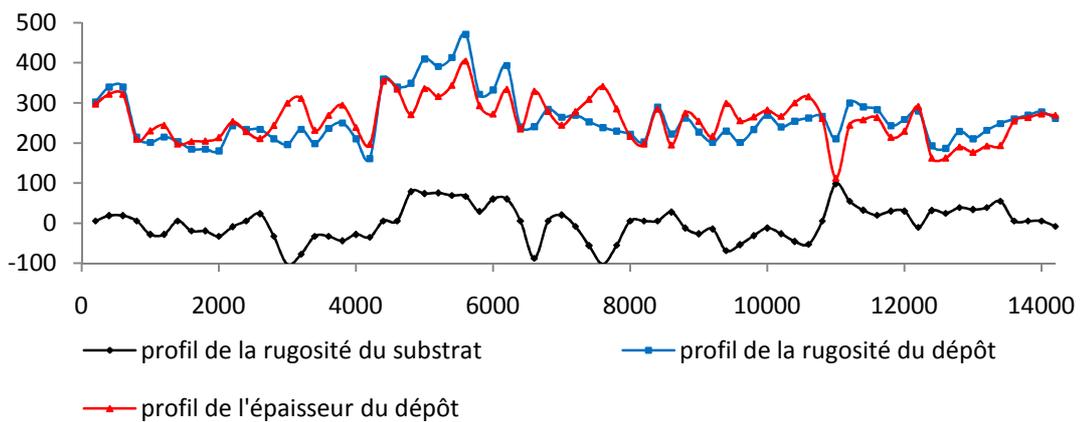


Figure III-6. Profile d'épaisseur, de la rugosité du substrat et de la surface d'un dépôt en acier inox 55 E avec couche d'accrochage.

Les valeurs d'épaisseurs moyennes relevées pour chaque durée de projection pour les différents types de dépôts illustrés dans les figures III-7, III-8, III-9 et III-10 sont regroupées dans le tableau III-1 récapitulatif.

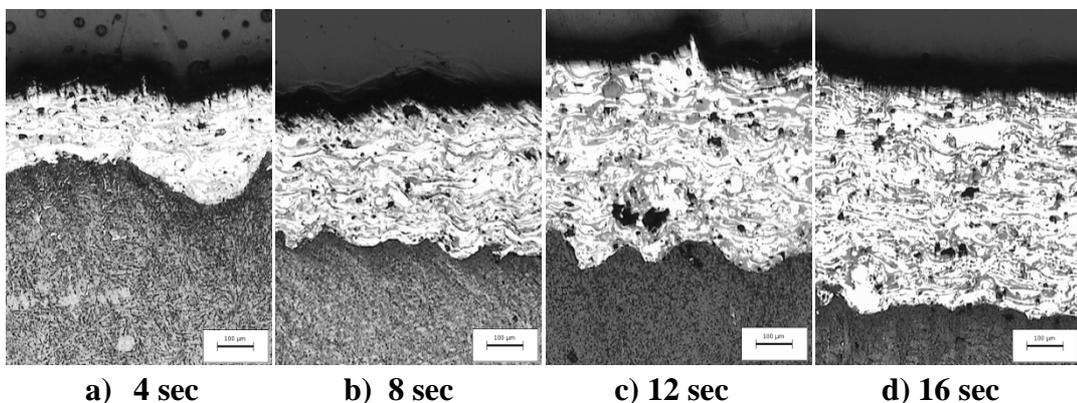


Figure III-7. Dépôts d'acier inox 55 E sans couche d'accrochage à différentes épaisseurs.

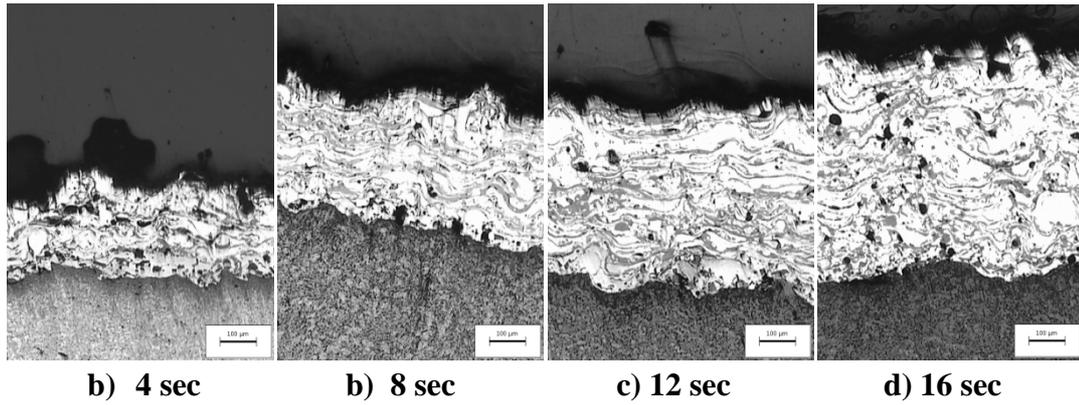


Figure III-8. Dépôts d'acier inox 55 E avec couche d'accrochage à différentes épaisseurs.

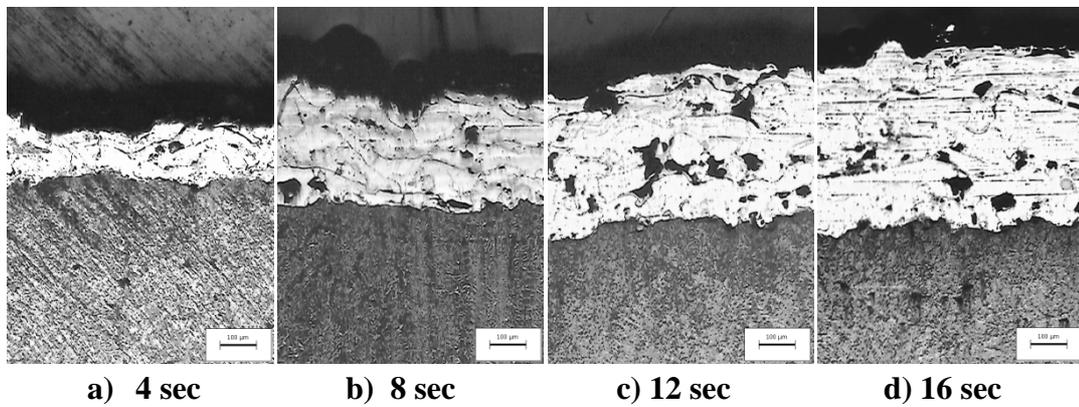


Figure III-9. Dépôts de molybdène sans couche d'accrochage à différentes épaisseurs.

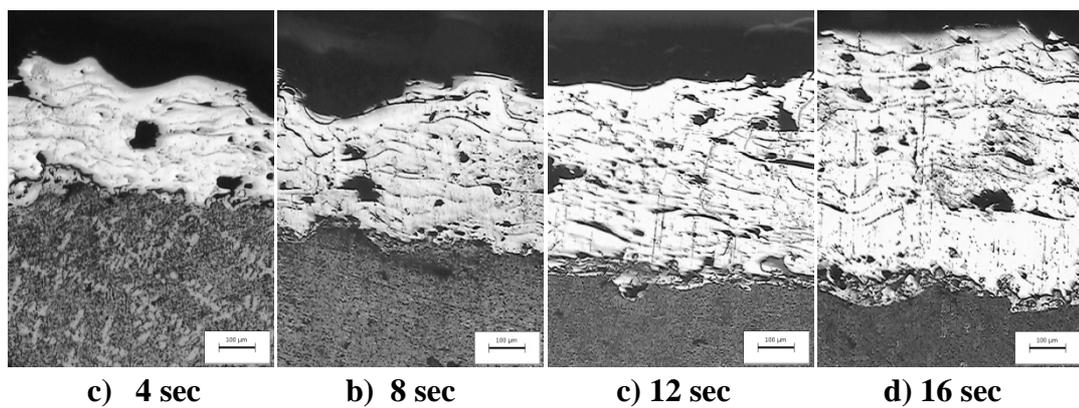


Figure III-10. Dépôts de molybdène avec couche d'accrochage à différentes épaisseurs.

Tableau III-1. Epaisseurs de l'ensemble des dépôts en fonction de la durée de projection.

Nature du dépôt \ Durée de projection (secondes)	4	8	12	16
Epaisseur du dépôt d'acier inox 55 E sans couche d'accrochage (µm)	224	447	787	905
Epaisseur du dépôt d'acier inox 55 E avec couche d'accrochage (µm)	259	460	607	701
Epaisseur du dépôt de molybdène sans couche d'accrochage (µm)	178	401	619	771
Epaisseur du dépôt de molybdène avec couche d'accrochage (µm)	308	447	715	1056

En procédant au tracé de l'épaisseur en fonction de la durée de projection à partir du tableau précédent, on constate que son évolution a une forme linéaire (figures III-11 et III-12).

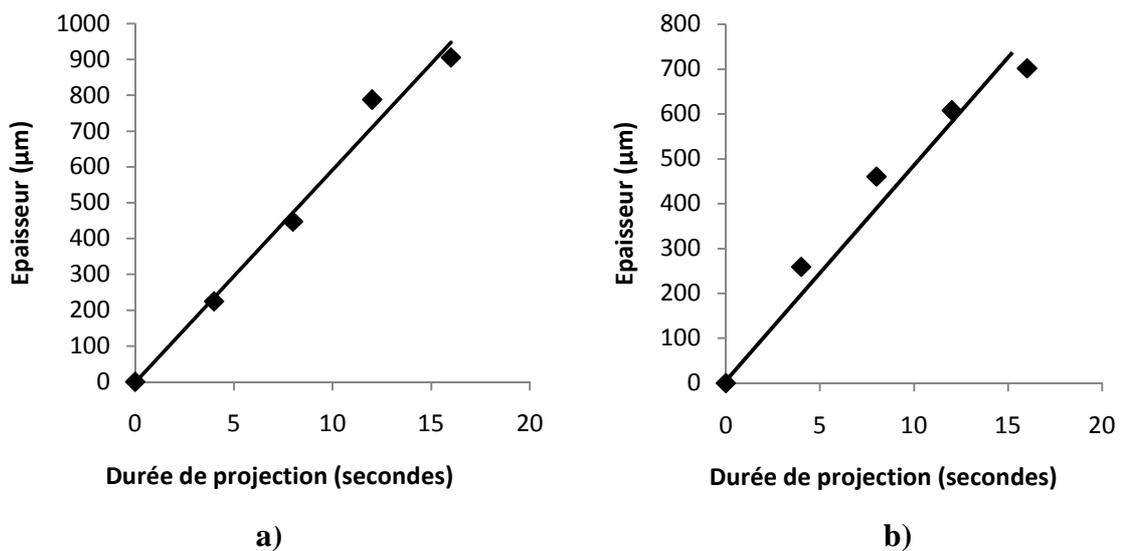


Figure III-11. Évolution de l'épaisseur en fonction du temps pour dépôts en acier inoxydable 55 E a) sans couche d'accrochage b) avec couche d'accrochage.

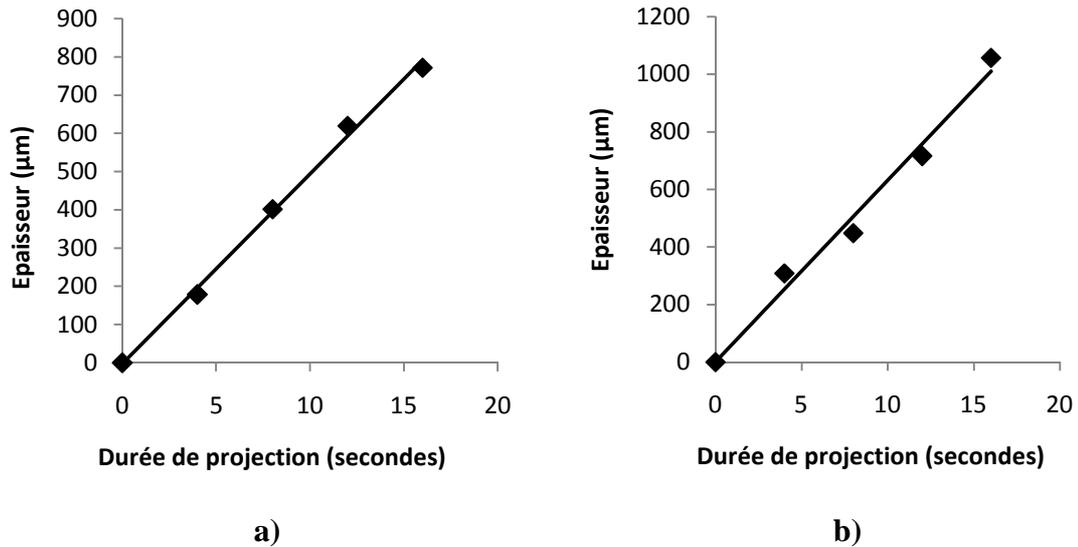


Figure III-12. Évolution de l'épaisseur en fonction du temps pour dépôts en molybdène **a)** sans couche d'accrochage **b)** avec couche d'accrochage.

Le fait qu'il y a une vitesse assez régulière de formation des dépôts peut s'expliquer par le débit constant de particules due à l'alimentation en fils du pistolet par des turbines d'air. Ces turbines fournissent ainsi un débit régulier de matière à projetée.

III.2.3 Rugosité des dépôts

Outre l'épaisseur des dépôts, on a pu tracer le profil des surfaces en utilisant les données précédemment collectées lors de la mesure d'épaisseur (en annexe) comme illustré dans la figure III.6 précédente. On remarque que pour les faibles épaisseurs, le dépôt épouse la forme du substrat qui est plus éclaboussé par l'impact des gouttelettes projetées à température élevée. Ceci explique une rugosité plus accentuée par rapport à celle produite par le sablage. Pour les épaisseurs élevées, la rugosité dépend de la finesse des lamelles et leur degré d'aplatissement [13,10]. Le tableau III-2 représente les valeurs de rugosités mesurées.

Tableau III-2. Rugosité des dépôts réalisés par projection thermique.

	Dépôts en acier inox 55 E								Dépôts en molybdène							
	Sans couche d'accrochage				Avec couche d'accrochage				Sans couche d'accrochage				Avec couche d'accrochage			
Épaisseur (µm)	224	447	787	905	259	460	607	701	178	401	619	771	308	447	715	1056
Rugosité Ra (µm)	31	69	45	91	52	37	38	43	42	75	91	99	68	79	99	59

Il faut noter aussi que le caractère manuel de l'opération de revêtement requiert une expérience et une dextérité dans la manipulation du pistolet à projection pour obtenir des épaisseurs uniformes sur toute la surface à revêtir.

III.2.4 Porosité dans les dépôts

Une observation micrographique des dépôts, nous révèle que les dépôts en acier inoxydable 55 E ont une porosité moins importante que ceux en molybdène (figure III-13).

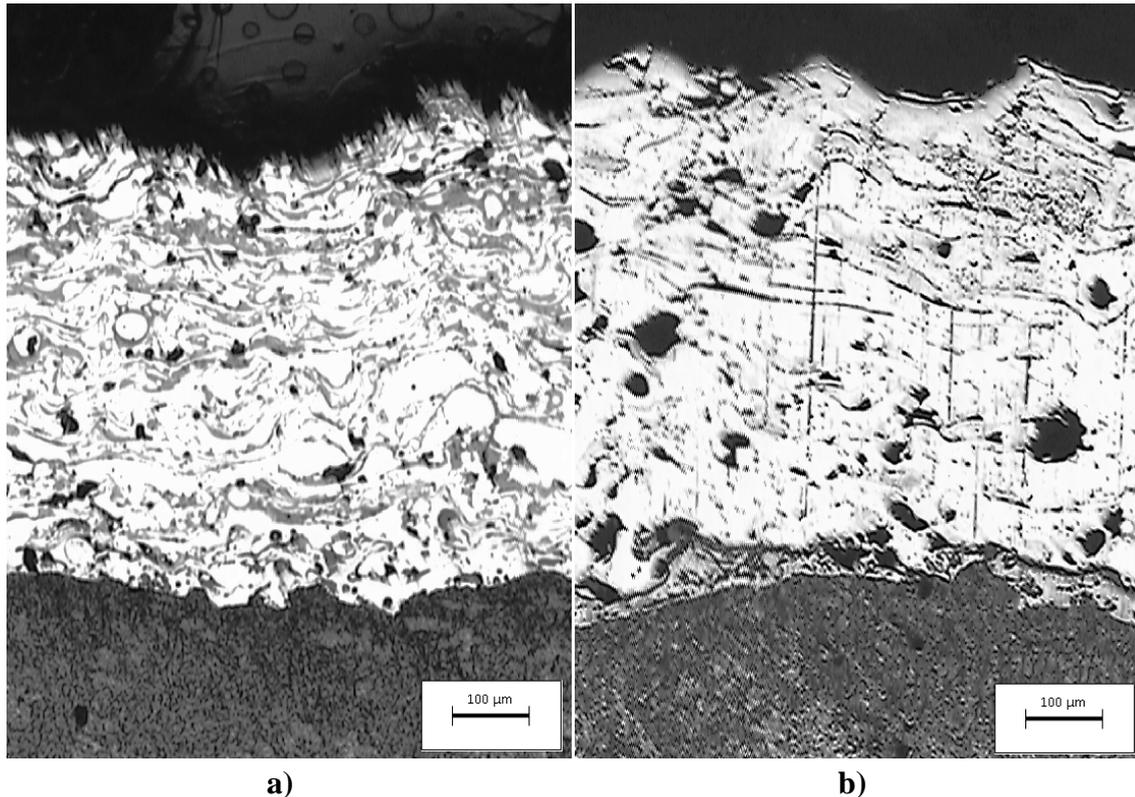


Figure III-13. Dépôts présentant une porosité **a)** acier inox 55 E **b)** molybdène.

Le fait que les dépôts en acier inox 55 E présentent une porosité aussi basse par rapport à ceux en molybdène réside, comme signalé précédemment dans l'état de fusion des particules projetées. On aura donc, des particules projetées d'acier inox 55 E bien fondues et à viscosité faible. Ce qui favorise le bon aplatissage des lamelles donc un remplissage des interstices créant ainsi un dépôt à grande compacité. A l'opposé de cela, des particules de molybdène moins fondues s'étalent plus difficilement sur le substrat. Ceci produit un dépôt plus poreux que celui en acier inox 55 E.

Les valeurs moyennes de porosités ont été calculées à partir de cinq images pour chaque dépôt réalisé. On a ainsi mesuré un taux de porosité inférieur ou égale à 5% pour les dépôts en acier inox 55 E (tableau III-3) et entre 6 – 9% pour ceux en molybdène (tableau III-4). Toutefois, tous ces dépôts (même les plus poreux) sont conformes aux exigences des normes en vigueur (<12%).

Tableau III-3. Porosité des dépôts en acier inoxydable 55 E.

	Sans couche d'accrochage				Avec couche d'accrochage			
Epaisseur (µm)	224	447	787	905	259	460	607	701
Porosité (%)	5	5,1	2,9	3,1	4,6	3,5	4,2	5,2

Tableau III-4. Porosité des dépôts en molybdène.

	Sans couche d'accrochage				Avec couche d'accrochage			
Epaisseur (µm)	178	401	619	771	308	447	715	1056
Porosité (%)	5,8	5,9	7,4	9,4	9,8	8,9	6,7	8,3

III.2.5 Présence d'oxydes

On n'a pas pu mesurer le taux d'oxydes dans nos dépôts par manque de moyens. Mais une observation fine des micrographies nous permet de comparer la teneur en oxydes des dépôts d'acier inoxydable 55 E et de molybdène (figure III-14).

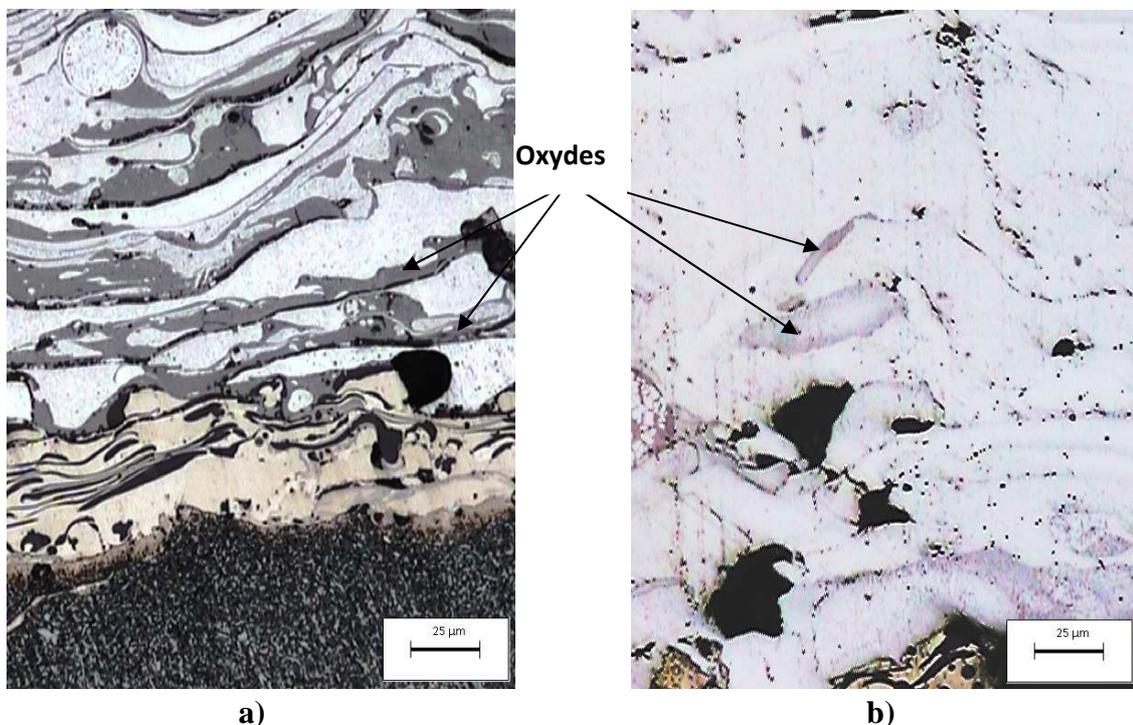


Figure III-14. Dépôts oxydés a) acier inoxydable 55 E b) molybdène.

Il est clair que pour les deux matériaux, le phénomène d'oxydation est inévitable vu la température atteinte (supérieure à la température de fusion) ainsi que l'utilisation d'air comprimé comme flux atomiseur. Mais la forte teneur en oxydes des dépôts en acier inoxydable 55 E par rapport à ceux en molybdène pour les mêmes conditions de projection peut s'expliquer par la température et l'état de fusion des particules. En effet, la surfusion des particules en inox 55 E, diminue leur viscosité ce qui favorise des mouvements de convection induits au sein de la gouttelette liquide par l'écoulement du gaz d'atomisation (figure III-15). Ces mouvements entraînent de l'oxygène et des oxydes vers le centre de la gouttelette et amènent du métal frais en surface qui peut alors s'oxyder. Par contre, ce phénomène est réduit pour les gouttelettes de molybdène vu leur grande viscosité. On aura donc des particules d'acier inox 55 E plus oxydées à leur arrivée sur le substrat que celles du molybdène.

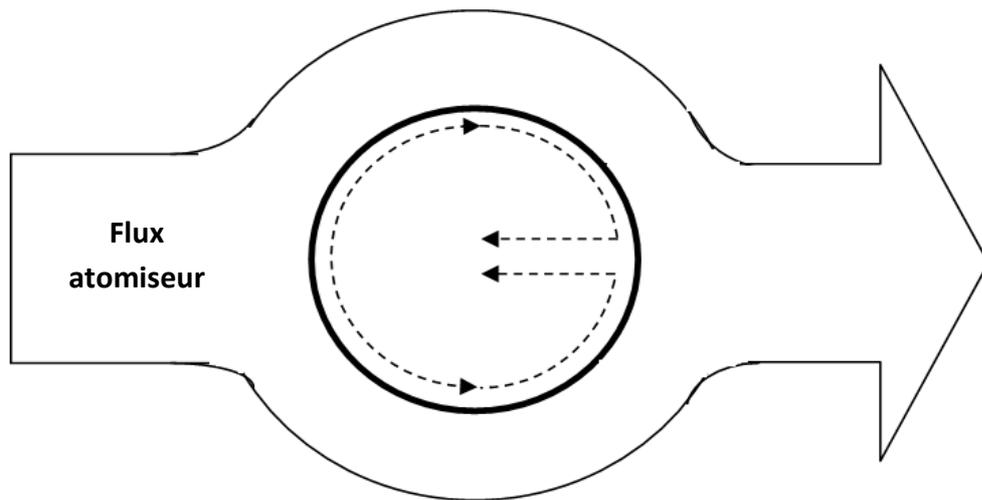


Figure III-15. Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette.

III.2.6 L'adhérence

On peut apprécier la qualité du dépôt par son adhérence au substrat. Les micrographies réalisées sur l'interface de contact dépôt/substrat, nous donne des informations générales sur cette qualité d'adhérence.

On a constaté qu'un phénomène d'ancrage se produit pour les substrats sans couche d'accrochage lors de l'impact des particules d'acier inox 55 E (figure III-16) et de molybdène (figure III-17). Ceci est dû à la température relativement élevée de ces particules par rapport à la température de fusion du substrat ($> 575^{\circ}\text{C}$) [10]. Cette température augmente la plasticité de notre alliage (A-S13) au niveau de l'interface de contact particule/substrat ce qui favorise la pénétration des gouttelettes. Lors de la mesure de la rugosité à l'interface substrat/dépôt, on a constaté qu'elle est plus grande que celle produite initialement par sablage (en annexe).

Il faut noter que, la température des particules supérieures à celle de la fusion du substrat n'implique pas une fusion de celui-ci. Car, le temps de refroidissement est extrêmement court qui est de l'ordre de quelque microseconde [18,10].

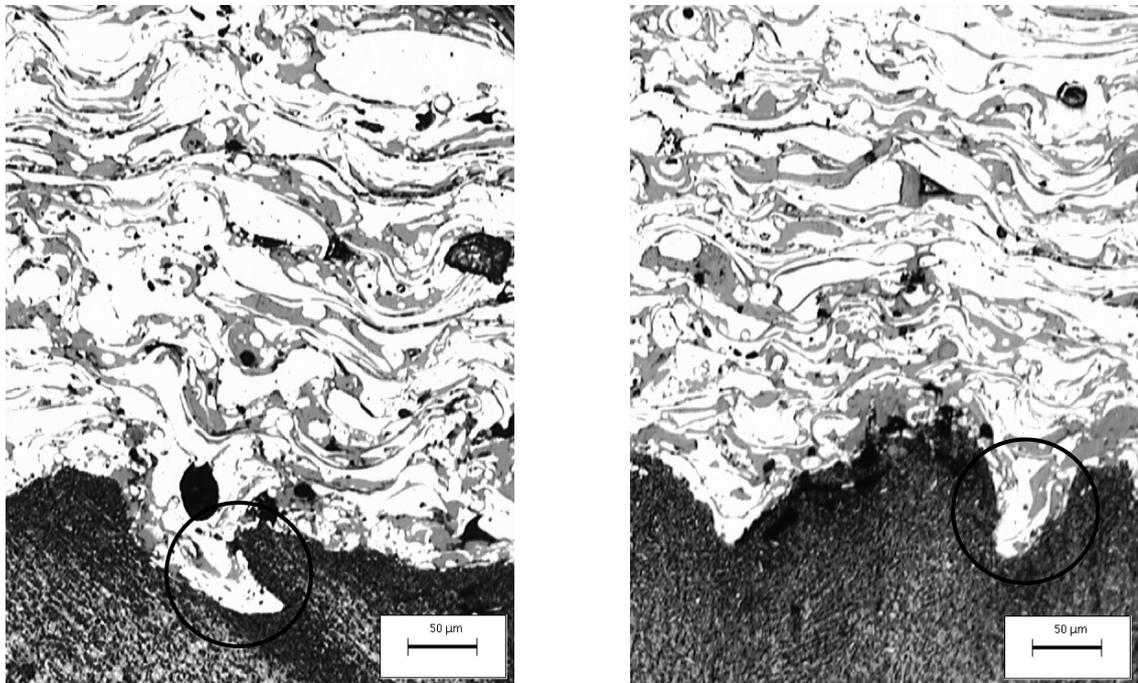


Figure III-16. Phénomène d'ancrage pour les dépôts en acier inox 55 E

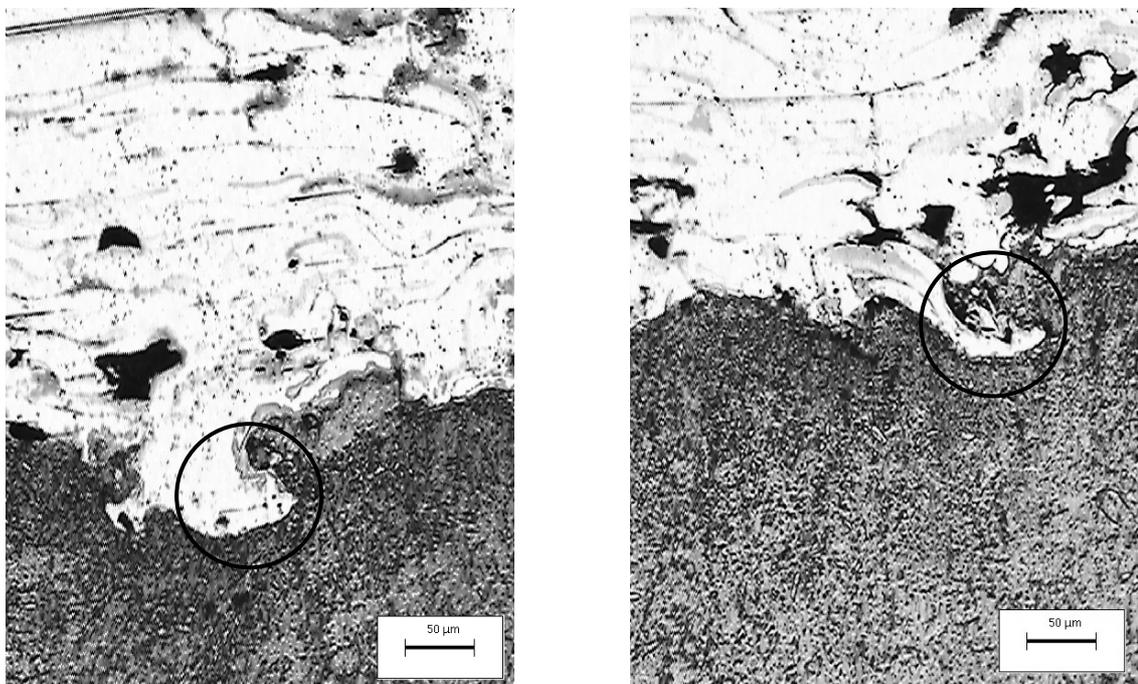


Figure III-17. Phénomène d'ancrage pour les dépôts de molybdène.

En plus de la température élevée des particules d'acier inox 55 E, leur état de fusion leur permet d'épouser bien la forme du relief (substrat). Alors que le molybdène est réputé comme le reste des matériaux à température de fusion très élevée d'avoir une bonne adhérence [2]. Il a été longtemps utilisé comme couche d'accrochage pour les dépôts présentant une mauvaise adhérence. Donc pour les deux matériaux projetés, on observe une bonne adhérence au substrat sans couche d'accrochage (figure III-18).

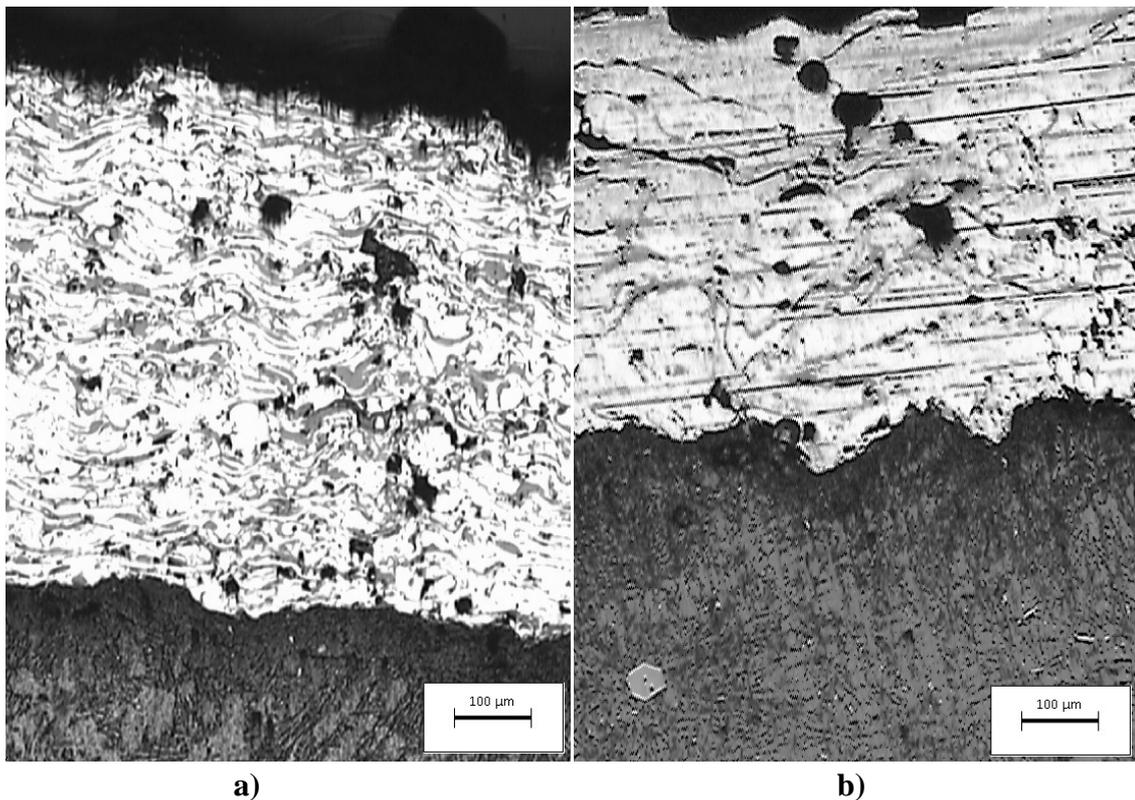


Figure III-18. Dépôts sur substrat sans couche d'accrochage
a) acier inox 55 E b) molybdène.

Pour les dépôts avec sous couche d'accrochage, on remarque que le phénomène d'ancrage des particules projetées est réduit. Cela est dû à la température de fusion relativement plus élevée de la couche d'accrochage en Ni-Al que celle du substrat. Mais en général l'adhérence de ces dépôts est d'excellente qualité (figure III-19 et III-20) sans pour autant constater une franche amélioration par rapport à nos dépôts sans couche d'accrochage. Seul un test d'arrachement peut nous fournir des détails plus poussés sur cette différence d'adhérence.

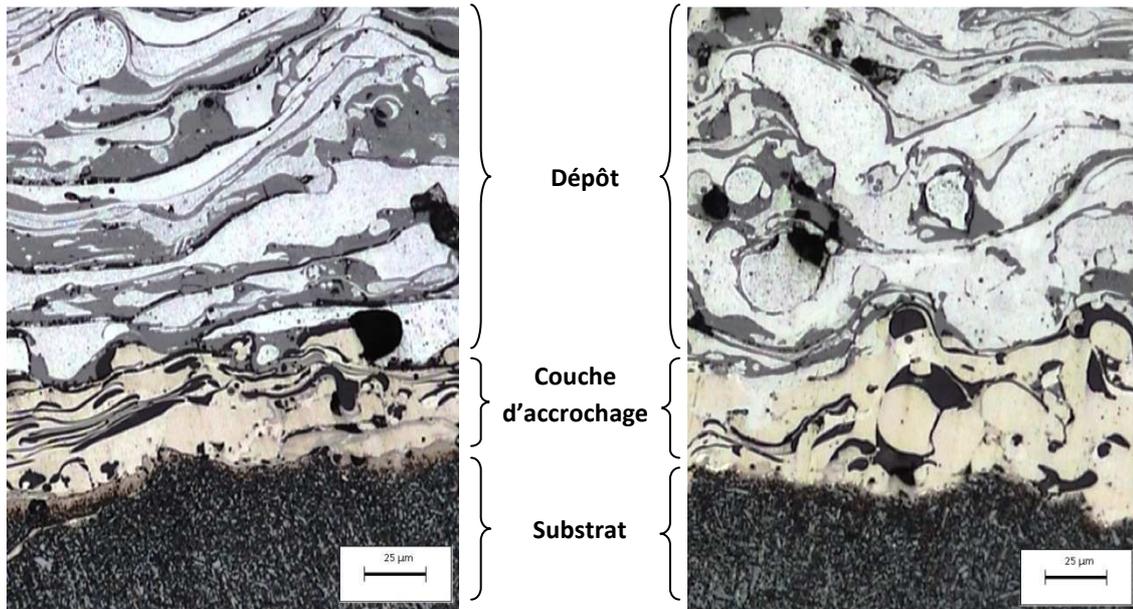


Figure III-19. Dépôts d'acier inoxydable 55 E avec couche d'accrochage.

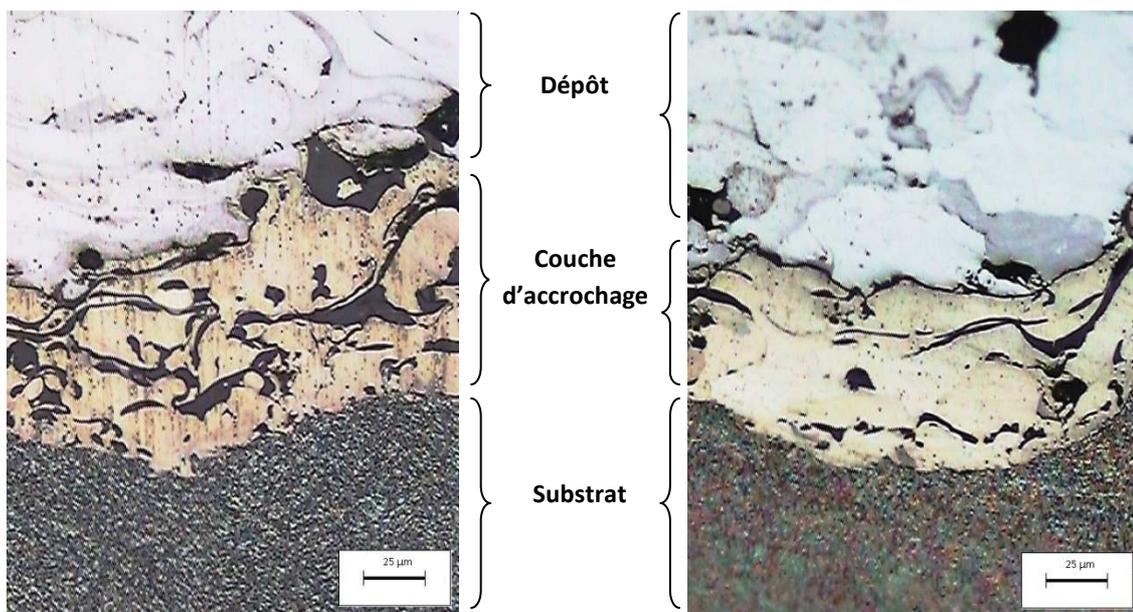


Figure III-20. Dépôts en molybdène avec couche d'accrochage.

Ceci dit, on ne peut nier que cette sous couche a une importance cruciale pour les matériaux à faible adhérence ainsi que ceux évoluant dans des milieux à forte contraintes thermiques. En effet, cette couche supplémentaire agit comme un régulateur en accommodant les coefficients de dilatation des différents matériaux constituant le dépôt et ainsi réduire le risque de décolage. Cela a été démontré par différentes études [34,35].

III.2.7 La microdureté

La microdureté des dépôts destinés aux applications mécaniques et tribologiques a une importance capitale. Car comme exposé dans la bibliographie, cette caractéristique détermine l'aptitude d'un matériau à résister à l'usure.

Les valeurs de la microdureté affichées sur les courbes présentées ci-dessous ont été calculées à partir d'une moyenne de trois essais. En premier temps, on remarque que les microduretés des matériaux projetés (Ni-Al, Mo et acier inox 55 E) sont supérieures à celles du substrat. Donc ces matériaux peuvent être utilisés pour améliorer la tenue à l'usure de notre alliage 44100 (A-S13). Le fait que les microduretés des dépôts d'acier inox 55 E sont plus grandes que celles des dépôts en molybdène peut s'expliquer par la forte teneur en oxydes ainsi que leur structure en lamelles bien aplaties (grande compacité du dépôt).

Il faut noter qu'on s'est basé sur deux faits pour interpréter les variations de la microdureté.

- Le premier, est l'écrouissage du substrat par le sablage sur quelques dizaines de microns de profondeur. Ceci tend à augmenter légèrement la microdureté de notre alliage ; en plus de l'impact des gouttelettes fondues et la génération de contraintes thermiques [8].
- Le deuxième, est le recuit (adoucissement) qui réduit l'écrouissage ainsi que les contraintes thermiques et les tensions aux joints de grains du fait des températures atteintes (200-300°C). Ceci diminue légèrement la dureté [38].

III.2.7.1 Dépôts sans couche d'accrochage

a) Acier inoxydable 55 E

Dans le cas où l'épaisseur du dépôt est de 224 μm , on observe des valeurs de microdureté du substrat légèrement plus élevées au voisinage de l'interface dépôt/substrat. Ceci est dû à l'écrouissage initialement généré par l'opération de sablage. Suivant les figures III-21, III-22, III-23 et III-24, on remarque une diminution progressive de la microdureté du substrat au voisinage de l'interface en fonction de l'épaisseur du dépôt due à l'adoucissement du substrat par élimination de l'écrouissage et la réduction des tensions aux joints de grains (générées pendant le processus de fabrication des pièces de fonderie). Cette diminution progressive de la microdureté est en fonction des temps de maintien (durées de la projection thermique).

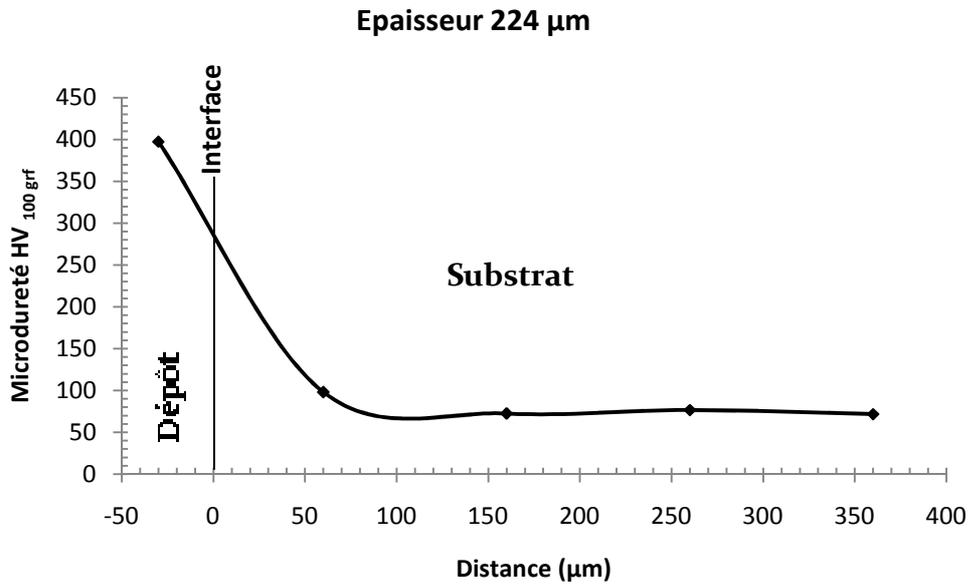


Figure III-21. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 224 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

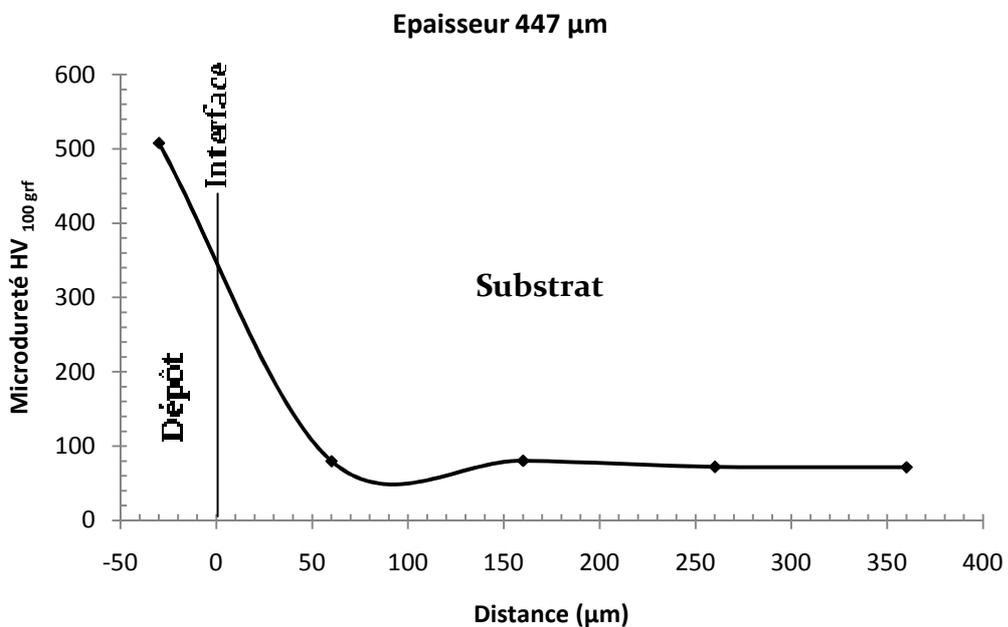


Figure III-22. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 447 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

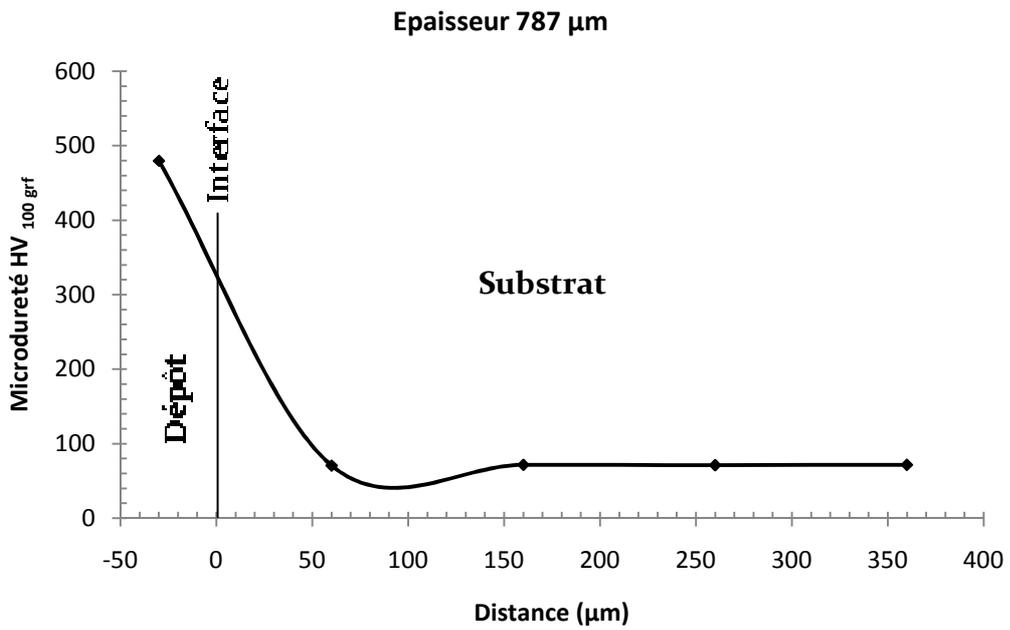


Figure III-23. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 787 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

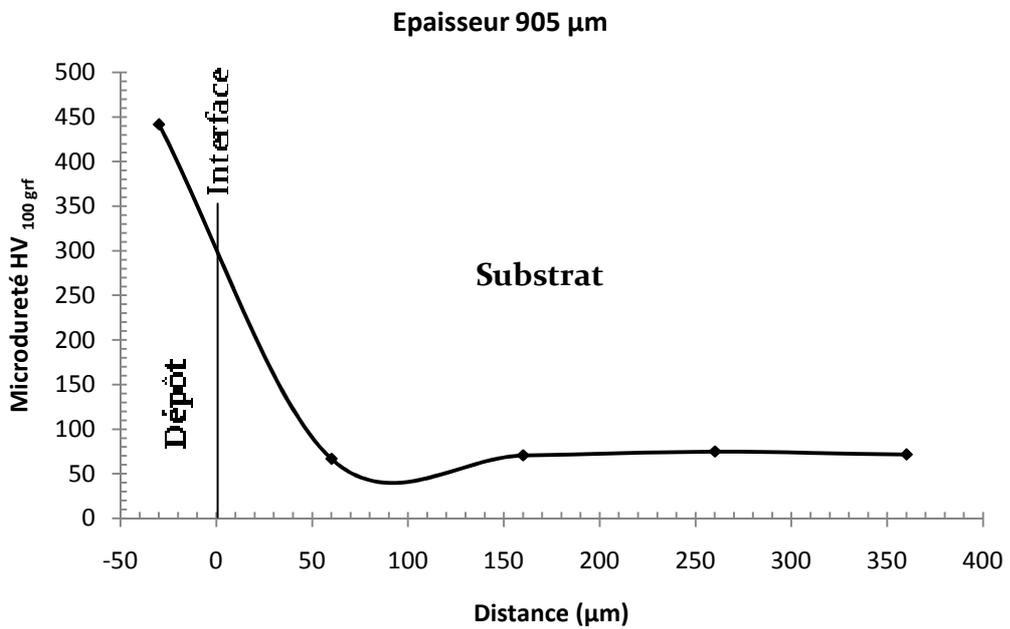


Figure III-24. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 905 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

b) Molybdène

Les explications sont les mêmes que pour les dépôts en acier inox 55 E. Mais vu la température plus élevée des dépôts de molybdène que celle des dépôts d'acier inoxydable 55 E, on aura un adoucissement et élimination des tensions aux joints de grains plus rapide (figures III-25, III-26, III-27 et III-28). Ceci dit, les distances sur lesquelles on constate une diminution de la microdureté à l'intérieur du substrat sont très faibles [18].

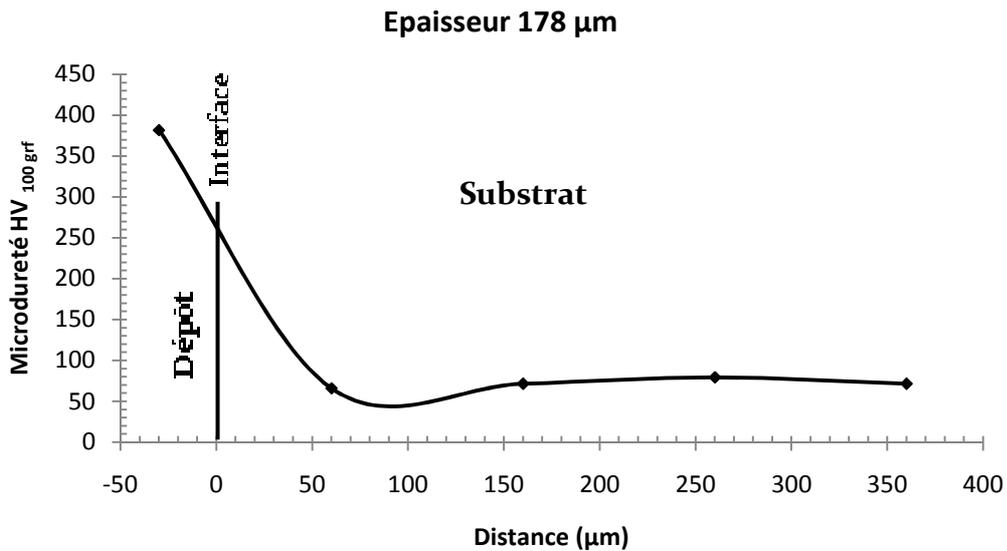


Figure III-25. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 178 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

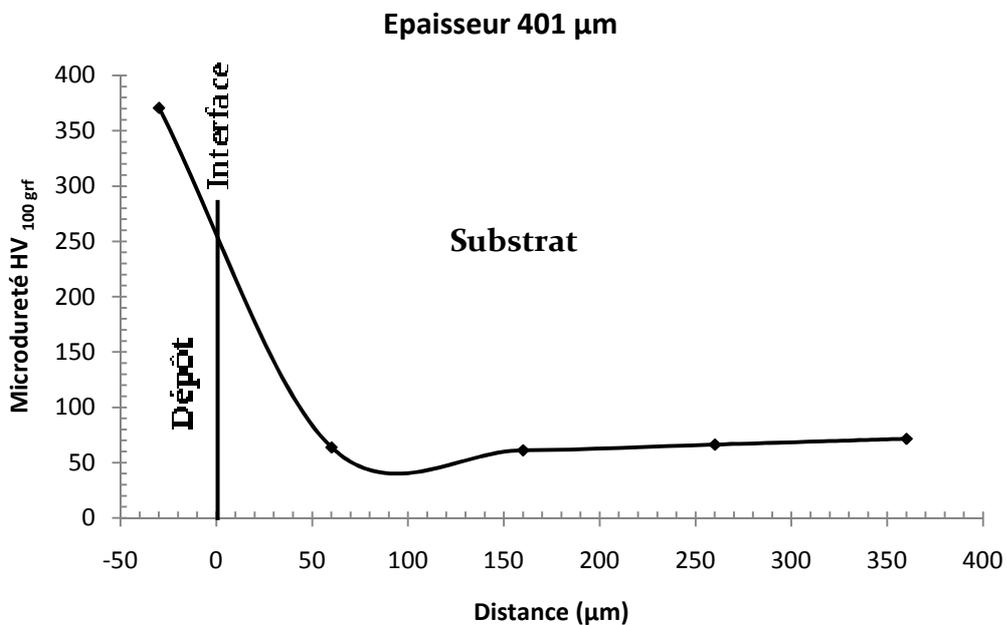


Figure III-26. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 401 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

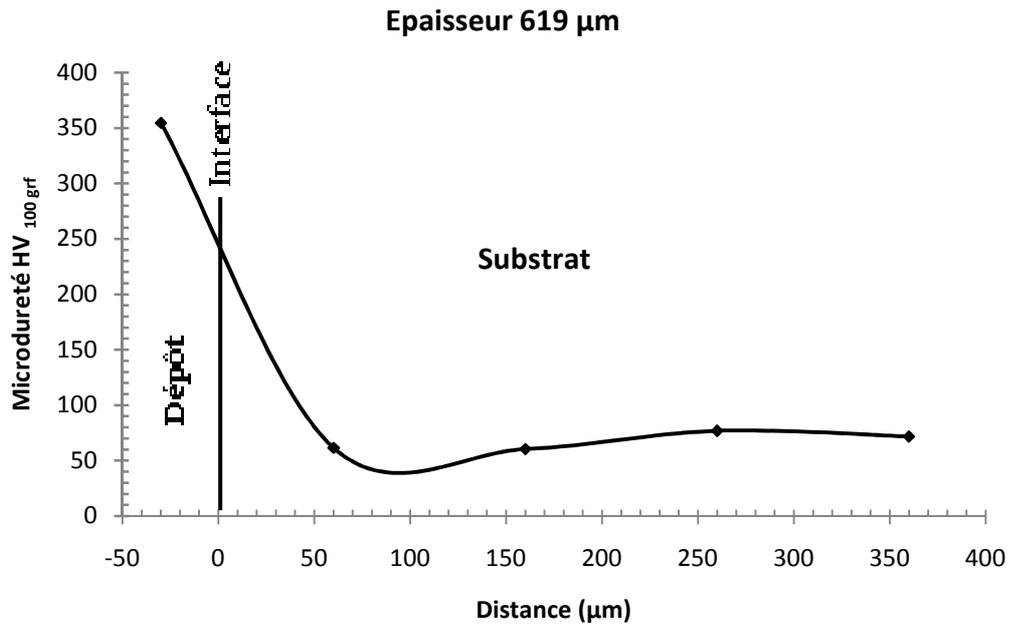


Figure III-27. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 619 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

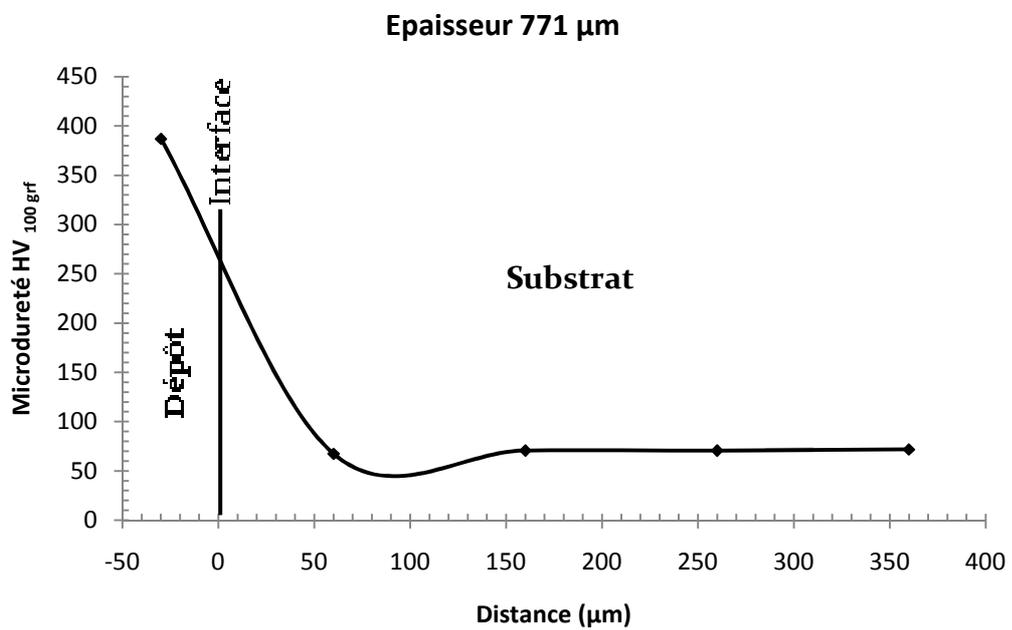


Figure III-28. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 771 μm d'épaisseur sans couche d'accrochage.

III.2.7.2 Dépôts avec couche d'accrochage

a) Acier inoxydable 55 E

D'après ce qui a été avancé, la microdureté élevée du substrat au voisinage de l'interface se rapporte à l'érouissage par sablage. Pour les différentes épaisseurs (figure III-29, III-30, III-31 et III-32), on remarque une légère diminution de la microdureté du substrat au voisinage de l'interface (dépôt/substrat). Cette diminution est due à l'effet de la température (adoucissement et élimination des tensions aux joints de grains). Ceci dit, vu la température atteinte relativement basse par rapport aux cas du molybdène et l'addition d'une couche d'accrochage (rôle d'une barrière thermique) font que la diminution de la microdureté est relativement lent.

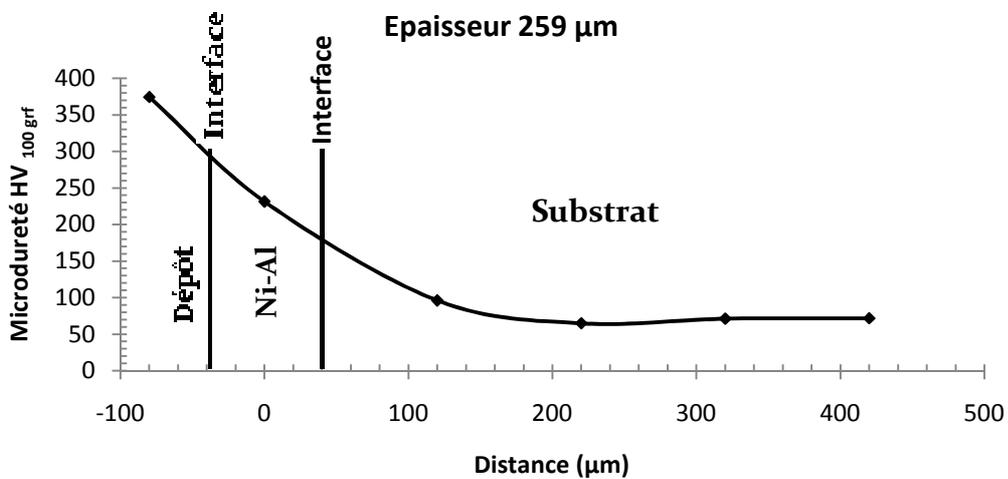


Figure III-29. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 259 µm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

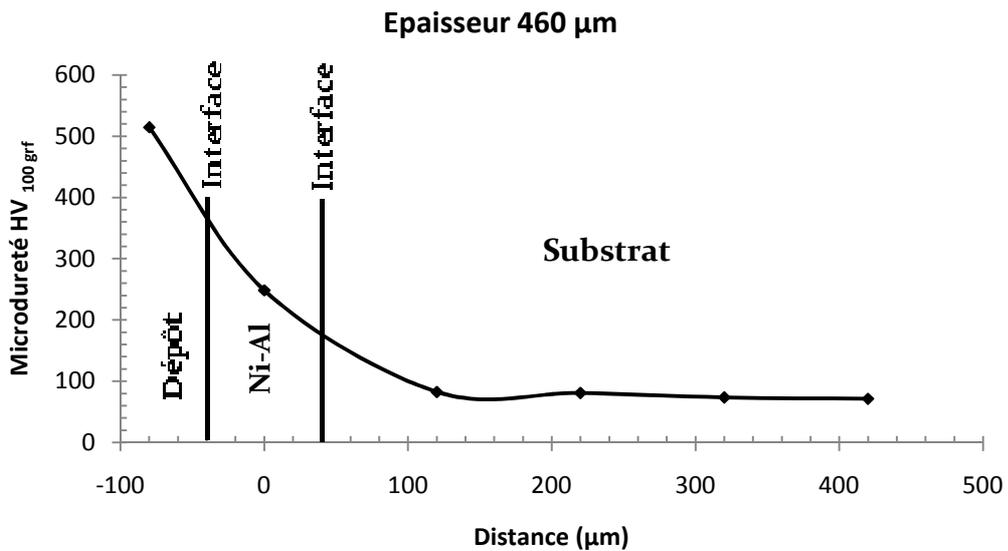


Figure III-30. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 460 µm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

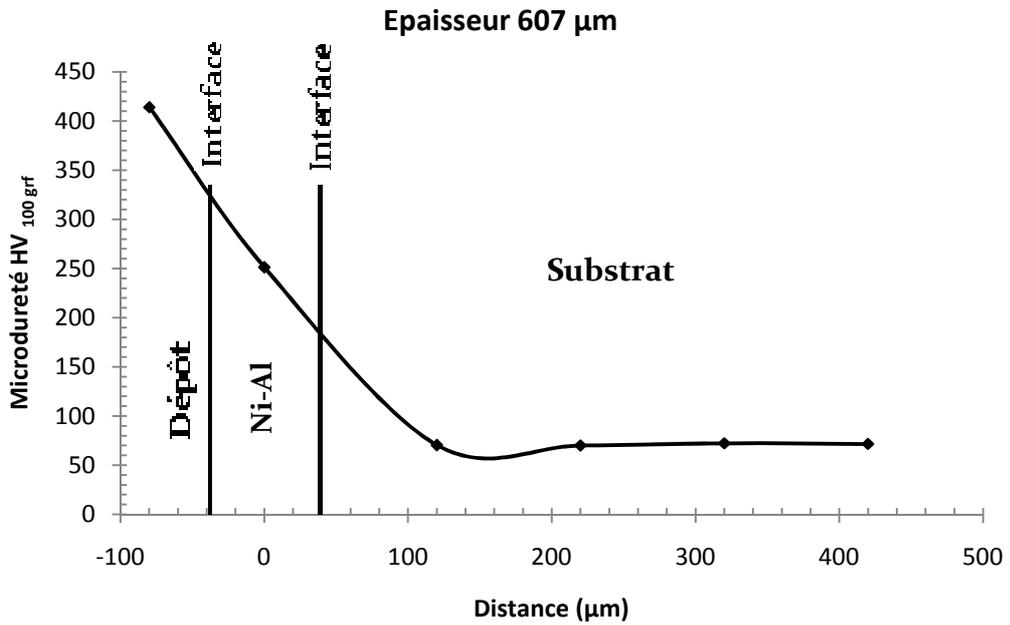


Figure III-31. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 607 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

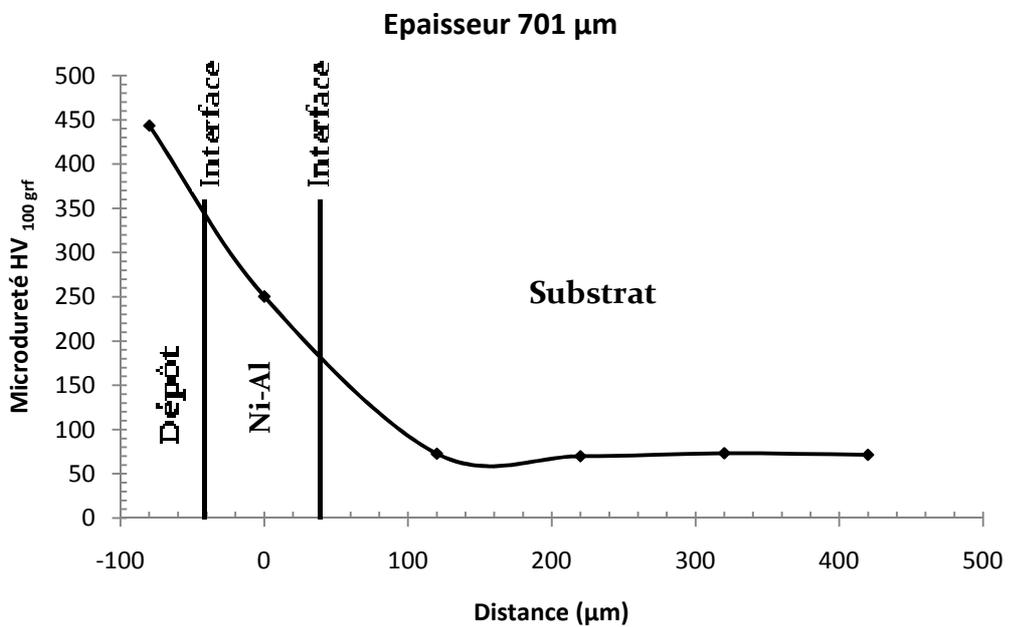


Figure III-32. Variation de la microdureté pour dépôt d'acier inox 55 E à 701 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

b) Molybdène

Comme pour les dépôts de molybdène sans couche d'accrochage, on observe une diminution de la microdureté du substrat au voisinage de l'interface en fonction de l'épaisseur du dépôt. Les explications sont identiques, quoique l'addition d'une couche d'accrochage rende l'adoucissement et l'élimination des tensions aux joints de grains relativement plus lents.

Les figures III-33, III-34, III-35 et III-36 représentent les variations de la microdureté pour les différentes épaisseurs de dépôts.

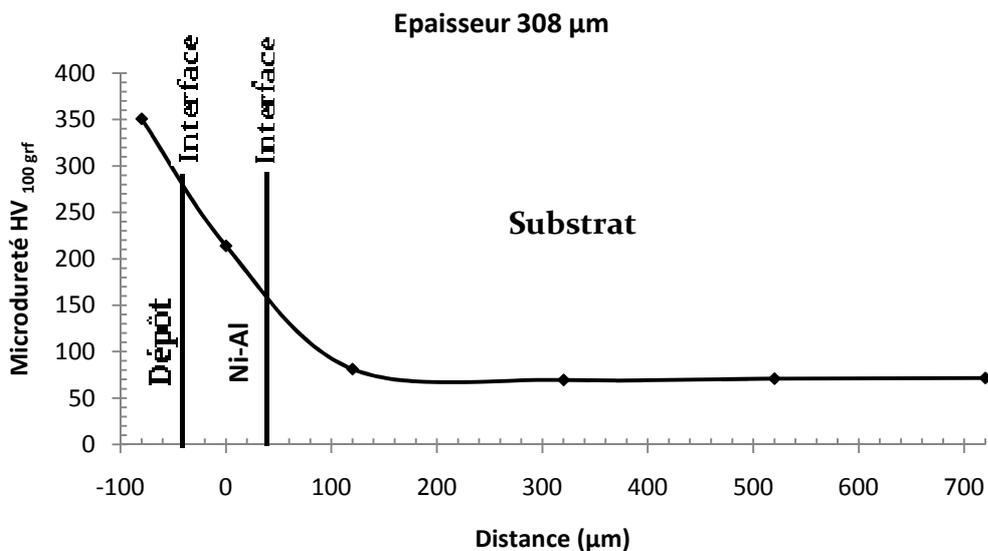


Figure III-33. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 308 µm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

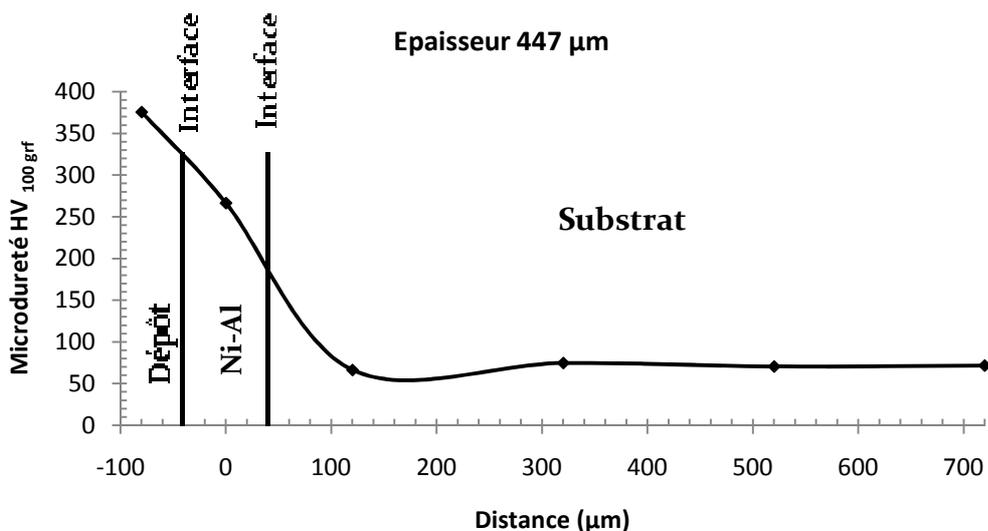


Figure III-34. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 447 µm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

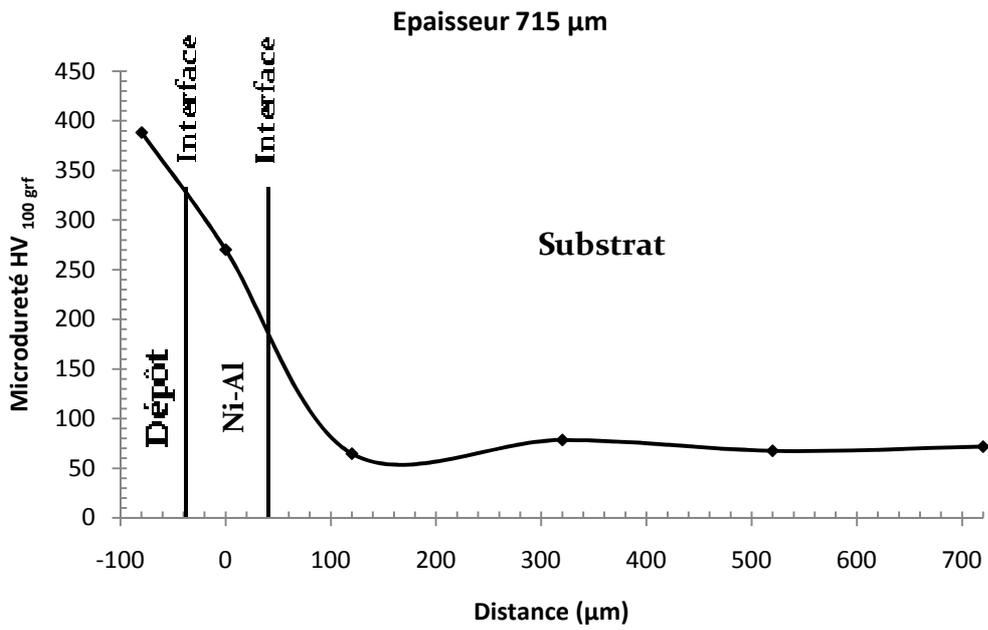


Figure III-35. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 715 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

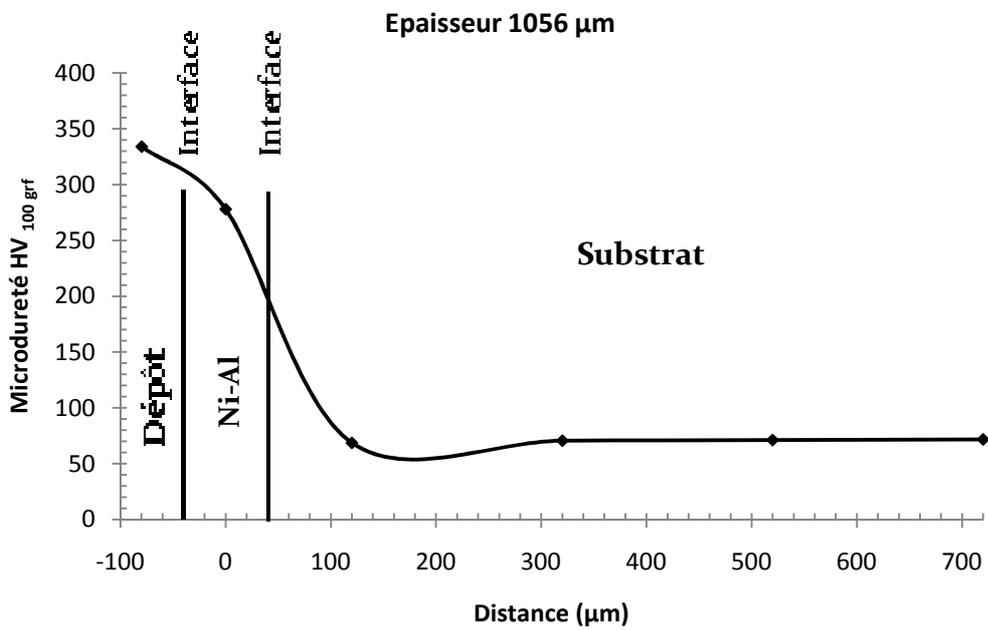


Figure III-36. Variation de la microdureté pour dépôt en molybdène à 1056 μm d'épaisseur avec couche d'accrochage.

Conclusion générale

La combinaison de matériaux durs et légers par le biais de la projection thermique permet de synthétiser des multimatériaux possédant des propriétés remarquables. Ainsi ces multimatériaux regroupent la légèreté et la résistance à l'usure qui font d'eux des produits convoités par les différentes filières de l'industrie.

L'objectif de notre étude est de réaliser des dépôts en matériaux durs (acier inox 55 E, Mo et Ni-Al 75 E) sur l'alliage d'aluminium 44100 (A-S13) et de les caractériser (rugosité, taux de porosité, adhérence et microdureté). Les différentes observations et résultats obtenus au cours de cette étude nous ont mené à tirer le bilan suivant:

- L'aptitude de l'alliage d'aluminium 4410 (A-S13) à la métallisation en acier inox 55E et en molybdène.
- La rugosité des dépôts en acier inox 55 E est généralement plus faible de celle des dépôts en molybdènes due à la finesse des lamelles, quoique pour les faibles épaisseurs de dépôts cette rugosité est influencée par le relief du substrat. Toutefois, la manipulation du pistolet de projection thermique requiert une certaine expérience pour obtenir une bonne distribution d'épaisseur de dépôt sur toute la surface de la pièce à revêtir.
- Les dépôts en acier inox 55 E présentent un taux de porosité plus faible que ceux en molybdène.
- L'adhérence des dépôts en acier inox 55 E et en molybdène est de bonne qualité même sans couche d'accrochage.
- La microdureté des dépôts en acier inox 55 E est plus élevée que celle en molybdène due au taux élevé d'oxydes mais aussi à cause de la grande compacité de ces dépôts.
- Vu la ductilité de notre alliage, un sablage avec des particules de taille relativement grossière provoque un écrouissage de la surface sablée. Ce qui explique l'augmentation de la microdureté du substrat au voisinage de l'interface (dépôt/substrat). D'un autre côté, l'échauffement du substrat au voisinage de l'interface pendant la projection thermique provoque une élimination de l'écrouissage ainsi que les tensions aux joints de grains. Ce phénomène pouvant être assimilé à un recuit [38], diminue légèrement la microdureté. Ceci est moins rapide pour les dépôts d'acier inox 55 E que pour ceux du molybdène, dû aux températures relativement plus basses pour le premier cas que dans le deuxième.

Notre étude pourrait être complétée et améliorée :

- En procédant à des tests d'arrachements pour une bonne compréhension des phénomènes d'adhérence et de cohésion des dépôts réalisés par projection thermique.
- Prévoir des distances de projection plus courtes pour la métallisation au molybdène afin de remédier au taux élevée de porosité.
- La substitution de l'air comprimé comme flux atomiseur par un gaz inerte pour réduire le phénomène d'oxydation des gouttelettes projetées.

Références bibliographiques

- [1]. Sylvain Audisio, Marcel Caultet, Alain Galerie et Henri Mazille. " Revêtements et traitements de surfaces : fonctionnalités, durabilité, procédés"(pp. 467-496). P.P.U.R. Lausanne (1999).
- [2]. W. E. Ballard. " Metal spraying : and the flame deposition of ceramics plastics "(pp. 1-6, 143-156, 179-203, 228-233). Griffin. London (1963).
- [3]. Alain Proner. "Revêtements par projection thermique" Techniques de l'ingénieur. M1645 (2003).
- [4]. Pechiney. " L'Aluminium Tome 1"(pp. 332-341, 359-470). Eyrolles. Paris (1964).
- [5]. Pechiney. " L'Aluminium Tome2"(pp. 3-62, 633-645, 683-769). Eyrolles. Paris (1964).
- [6]. Christian Vargel. " Corrosion de l'aluminium"(pp. 6-25). DUNOD. Paris (1999).
- [7]. Jean Barralis, Gérard Maeder et J.-P.Troignon. " Métallurgie"(pp. 169-170). AFNOR-Nathan. Paris (2005).
- [8]. Hans Jorg Mathieu, Erich Bergmann et René Gras. " Traité des matériaux V4: analyse et technologie des surfaces"(pp. 140, 142). P.P.U.R. Lausanne (2003).
- [9]. Michel Dupeux. " Aide-mémoire : science des matériaux"(pp. 216-220,288-291). DUNOD. Paris (2005).
- [10]. Lech Pawlowski. "dépôts physiques : techniques, microstructures et propriétés "(pp. 2-3, 24,67-79,113-118). P.P.U.R. Lausanne (2003).
- [11]. Robert C. Tucker. «V5 Hand-Book of surface ingeneering"(pp.1446-1457). ASM International. (1994).
- [12]. CETIM. "Traitements et revêtements de surface pour applications tribologiques" (pp. 27-42, 93-123). Paris (1995).
- [13]. Salman Nourouzi. "Contribution à l'étude du procédé arc-fil Pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive». Mémoire de doctorat. Université de Limoges (2004).
- [14]. Syed Asif Ansar. " Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc". Mémoire de doctorat. Université de Limoges (2004).
- [15] V. V. Kudinov, P. Y. Pekshev, V. A. Safiullin. "Forming of the structure of plasma sprayed materials, in High Temp" (pp. 381-418). Brill Academic Publishers. Leyden (1989).
- [16]. Khalid Fataoui. "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique". Mémoire de doctorat. Université de Limoges et université de Chouaib Doukkali (2007).
- [17]. Fadhel Ben-Ettouil. "Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc ". Mémoire de doctorat. Université de Limoges (2008).

- [18]. Yamina Mebdoua. " Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du Dépôt". Mémoire de doctorat. Université de Limoges (2008).
- [19]. Stéphane Valette. "Influence de la préoxydation d'un acier sur l'adhérence de son revêtement en alumine déposé par voie plasma thermique". Mémoire de doctorat. Université de Limoges (2004).
- [20]. Christian Vargel. " Comportement des alliages d'aluminium" (pp.8-9,13,19-20). Dunod technique. Paris (1979).
- [21]. R. B. C. Cayless. "V2 Hand-Book of properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials" (pp.39-111). ASM International (1990).
- [22]. R. Irrmann. "Fonderie d'aluminium en sable et en coquille" (pp. 1-21, 98-110). (1957).
- [23]. Hugh Baker, editor. "V3 Hand-Book of alloy phase diagrams" (pp. 23,85). ASM International (1994).
- [24]. S. Bensaada. " Technologie: première partie" (pp. 260-262). O.P.U. (2007).
- [25]. M. Warmuzek. " V9 Hand-Book of Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys" (pp.1688-1775). ASM International (2004).
- [26]. Fiche technique, "composition chimiques de l'alliage AS13". S.N.V.I. 2010.
- [27]. Fiche technique " normalisation des alliages d'aluminium de fonderie". AFNOR A57-702.
- [28]. Fiche technique " Alu flux B ". S.N.V.I. 2010.
- [29]. Fiche technique " COVERAL EP 9773 ". S.N.V.I. 2010.
- [30]. Fiche technique " COVERAL 55". S.N.V.I. 2010.
- [31]. Fiche technique " AQUAGEL 87 ". S.N.V.I. 2010.
- [32]. Fiche technique " DYCOLTE 34 ". S.N.V.I. 2010.
- [33]. Fiche technique " feuille d'opération de la coulée en coquille ". S.N.V.I. 2010.
- [34]. A. Sadki. " Etude de la protection du matériau aéronautique AU4G ". Mémoire de magister. ENP, 1998.
- [35]. Omar Ladjali. " Comportement en fatigue thermique de bimateriaux à base d'alliage d'aluminium ". Mémoire de magister. E.N.P. 2009.
- [36]. Jean-Marie Georges. " Frottement, usure et lubrification"(pp 408-410). CNRS, Eyrolles. Paris 2000.
- [37]. AFNOR-CEFRACOR. " Corrosion et protection des métaux Tome 2" (pp 438-452). AFNOR. Paris 1991.
- [38]. A. Dellali. "Étude métallographique des alliages d'aluminium de fonderie". PFE. E.N.P. 1986.

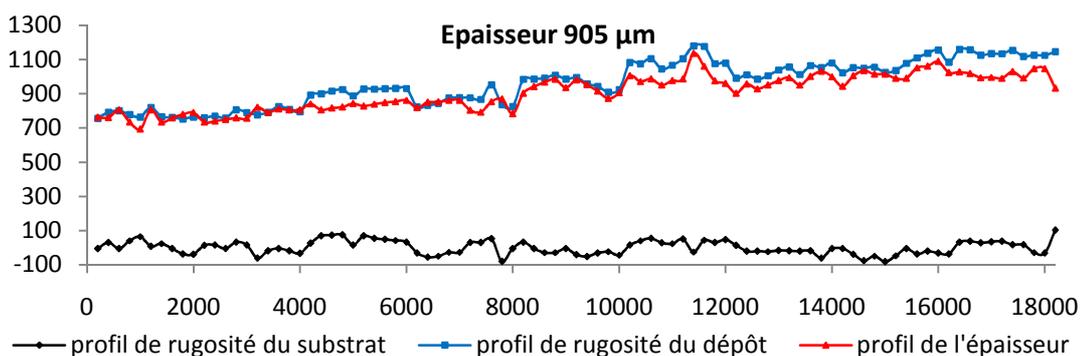
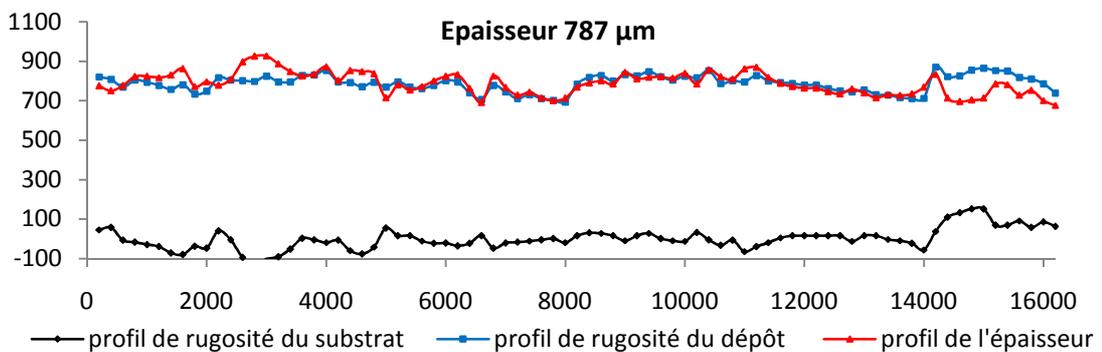
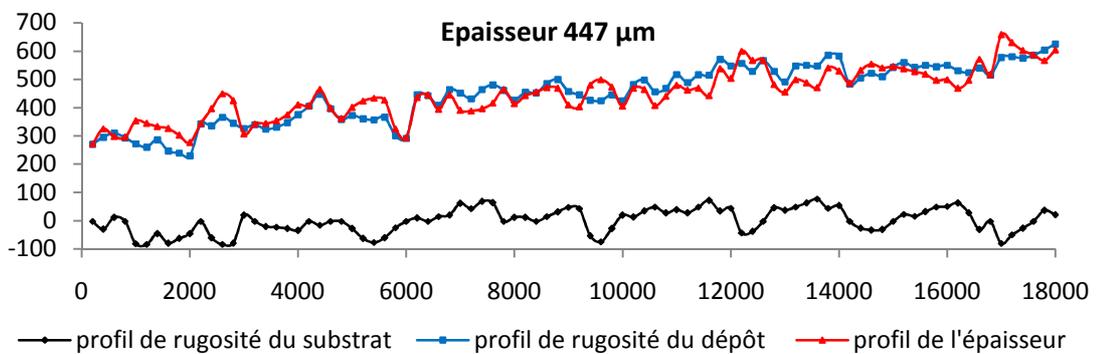
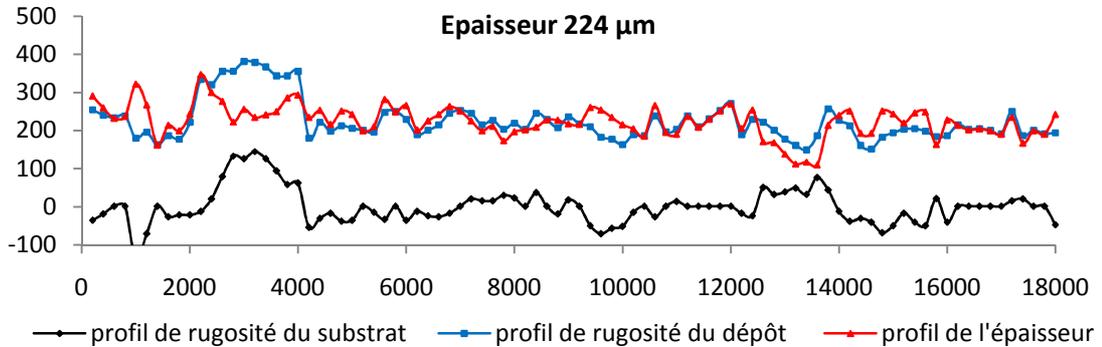
Annexes



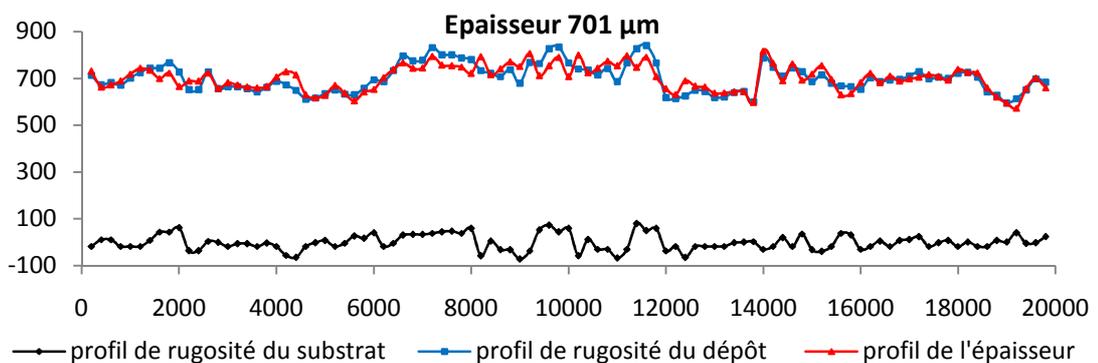
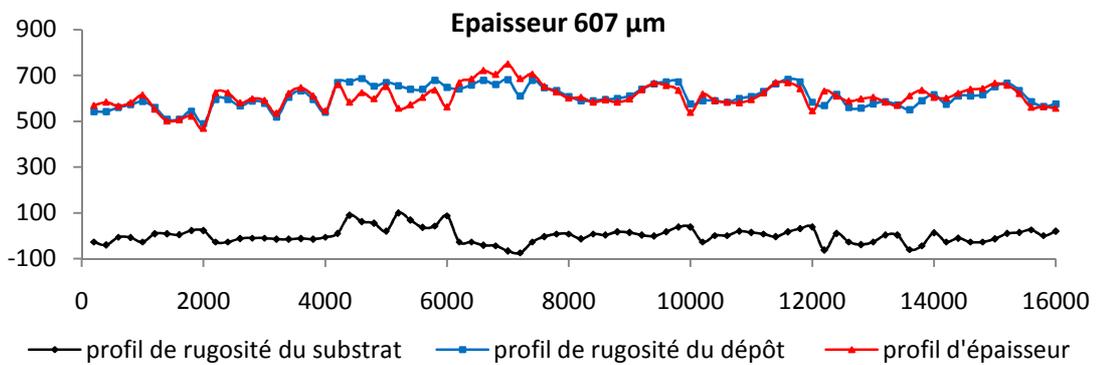
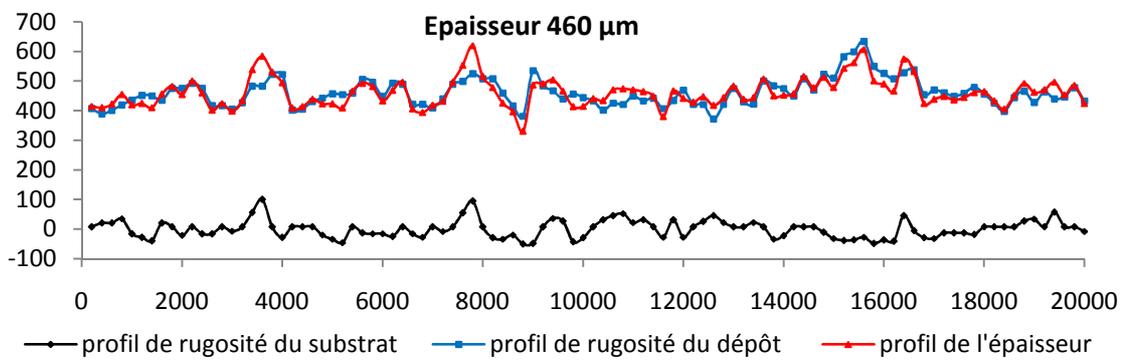
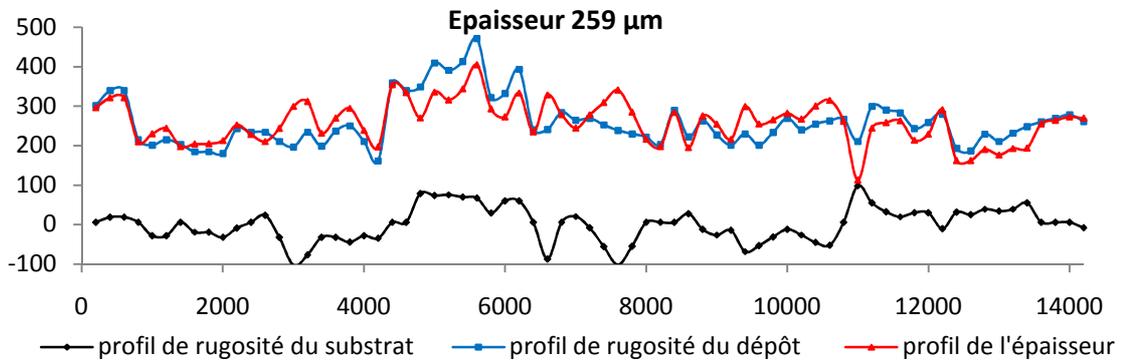
Annexe 1

Profils de rugosité et d'épaisseur

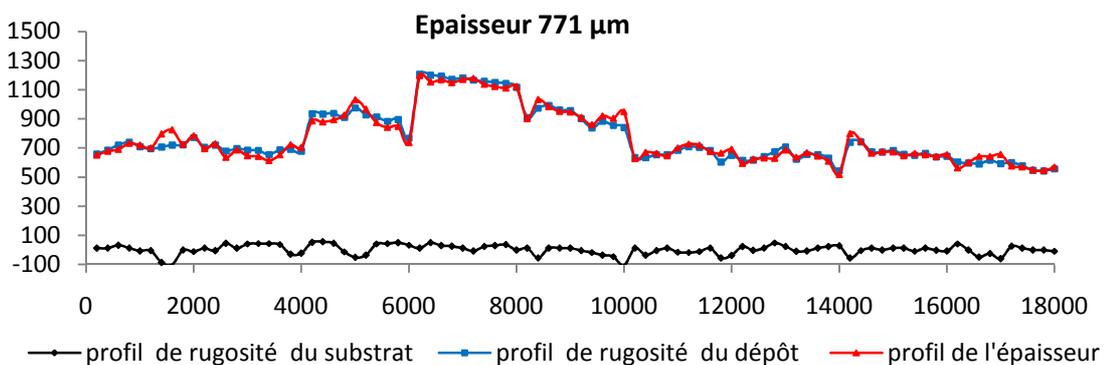
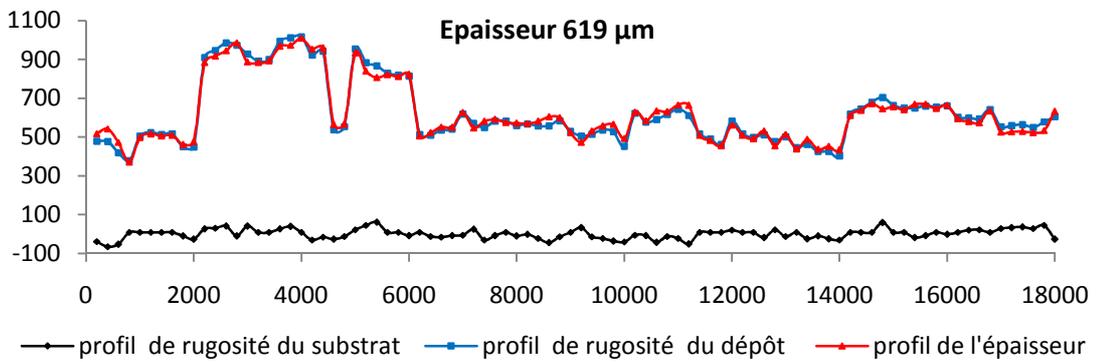
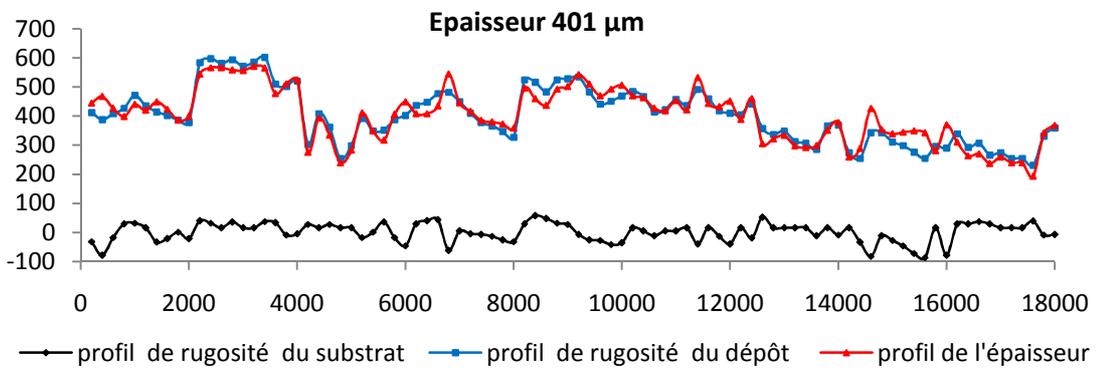
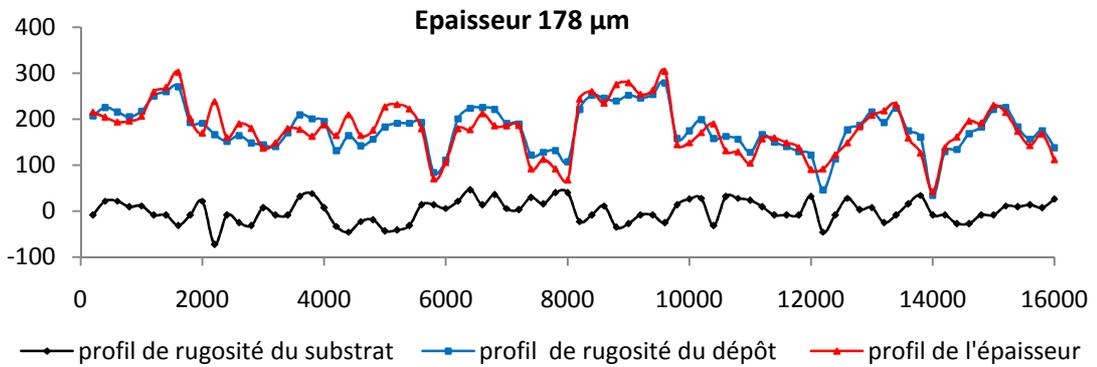
- Dépôts d'acier inoxydable 55 E sans couche d'accrochage

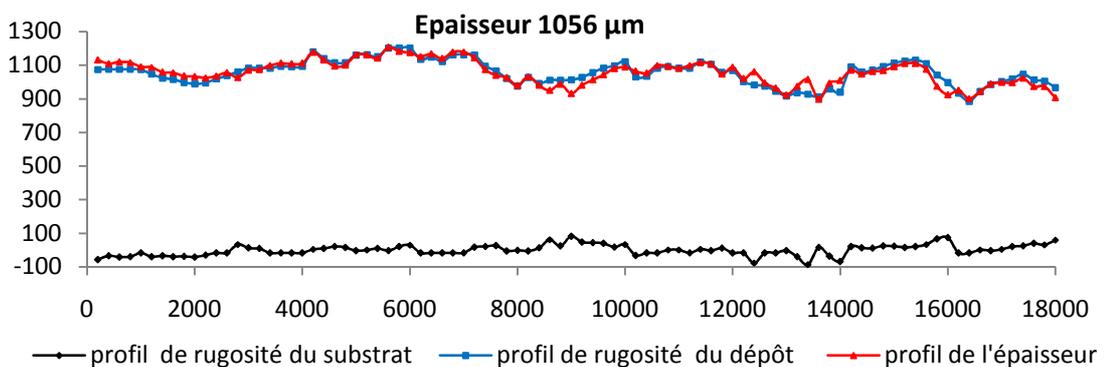
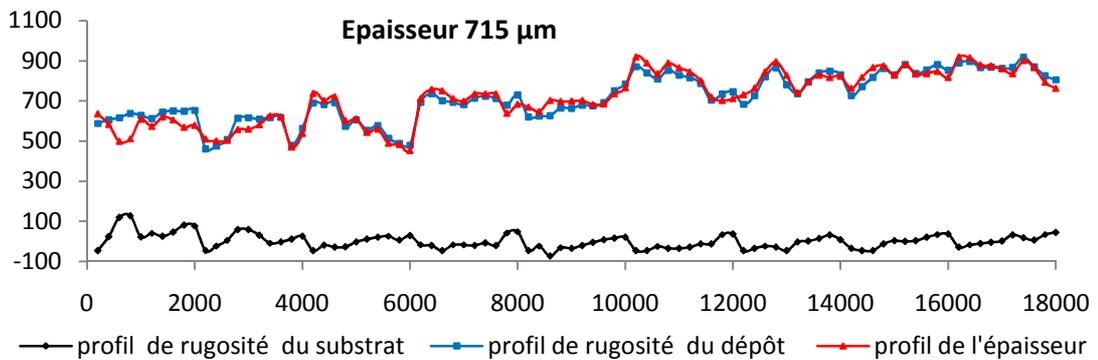
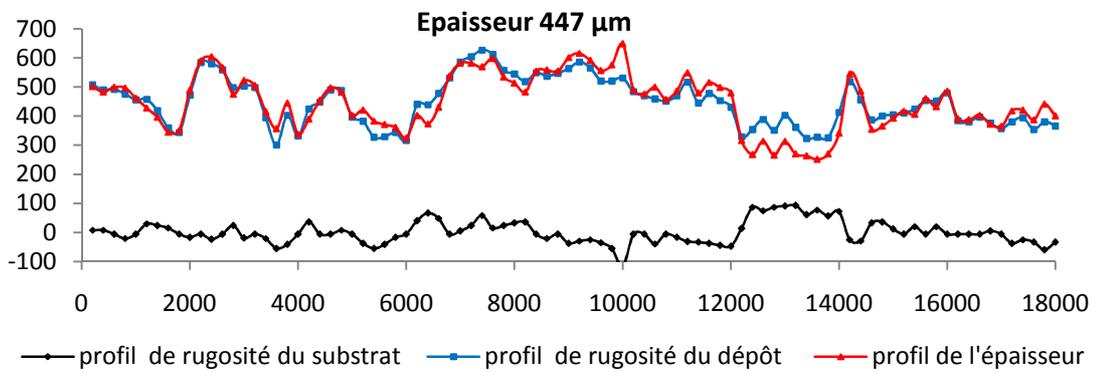
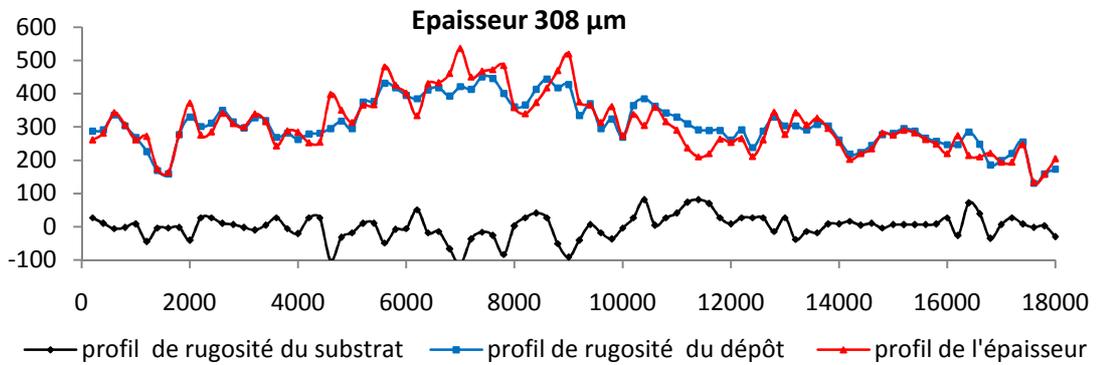


- Dépôts d'acier inoxydable 55 E avec couche d'accrochage



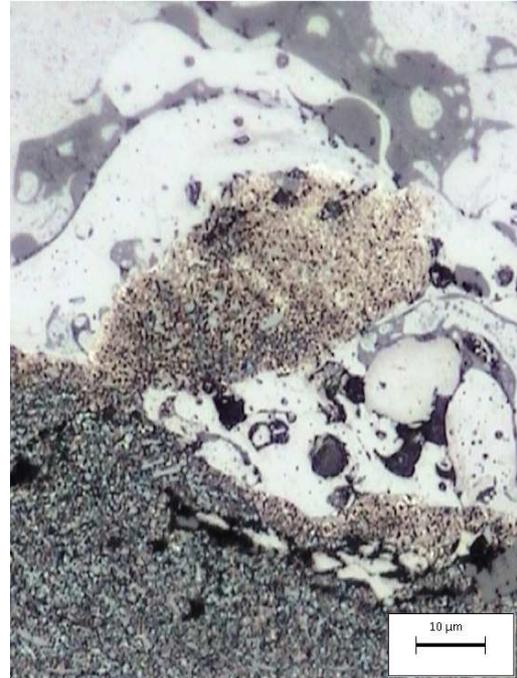
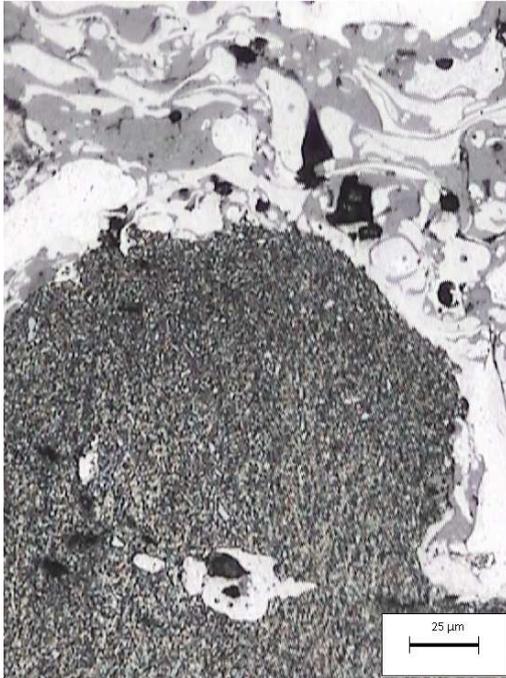
- Dépôts de molybdène sans couche d'accrochage



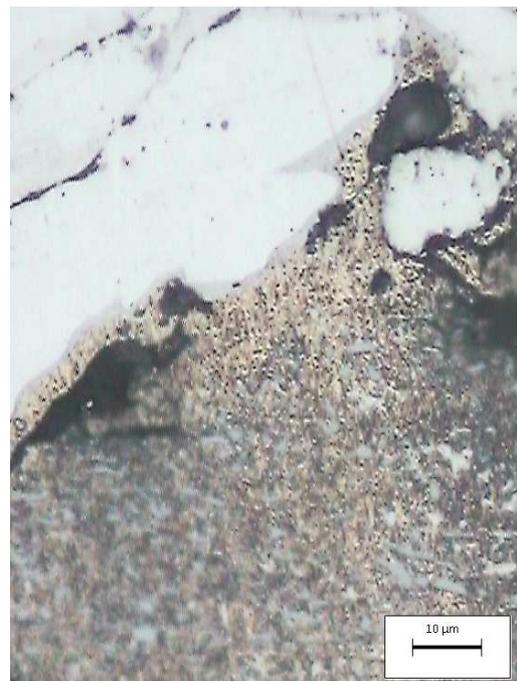
- Dépôts de molybdène avec couche d'accrochage

Annexe 2 Micrographies

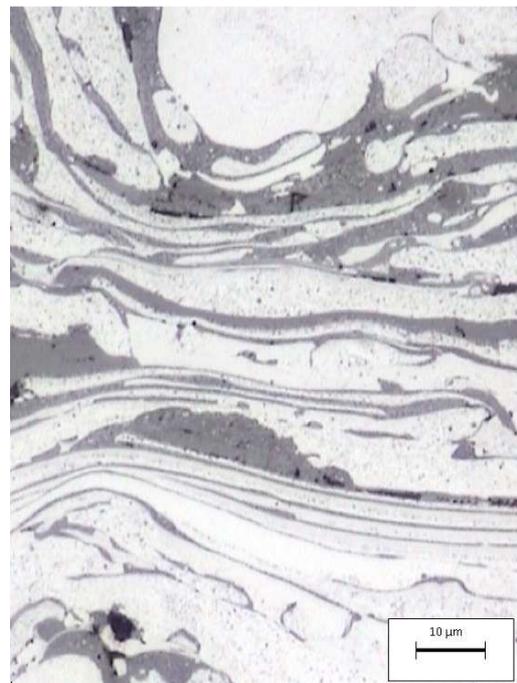
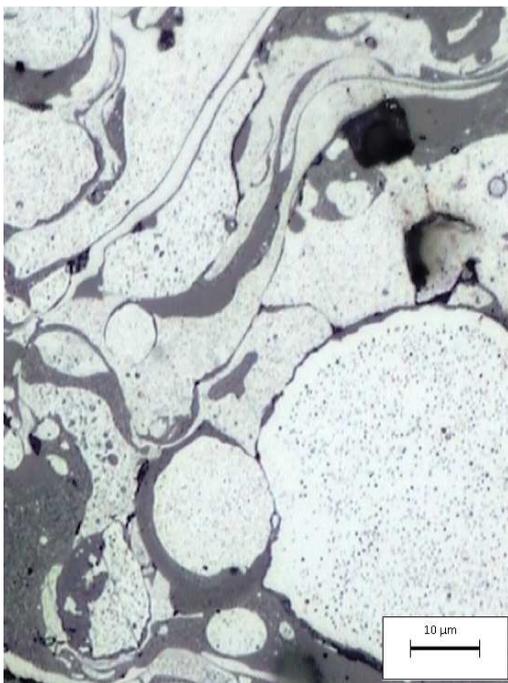
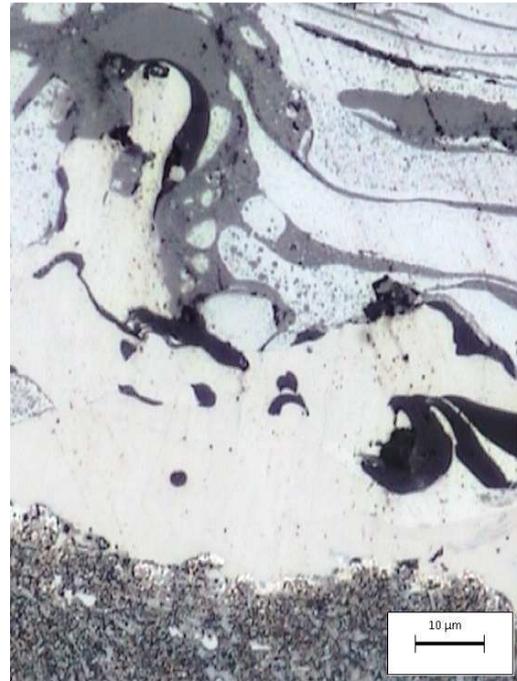
- Dépôts d'acier inoxydable 55 E sans couche d'accrochage



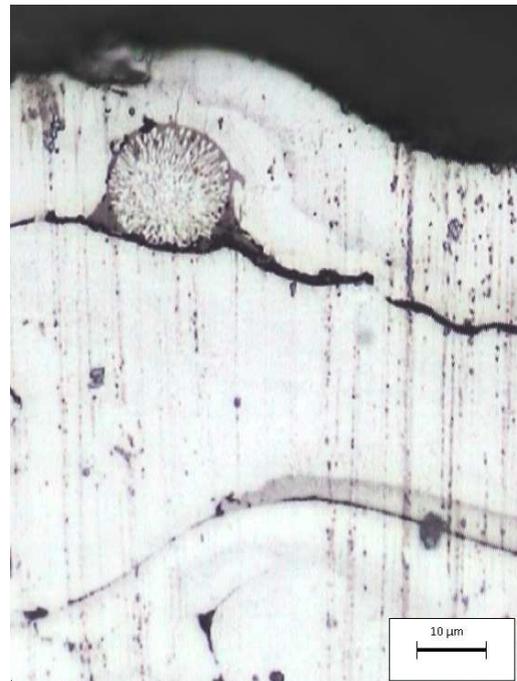
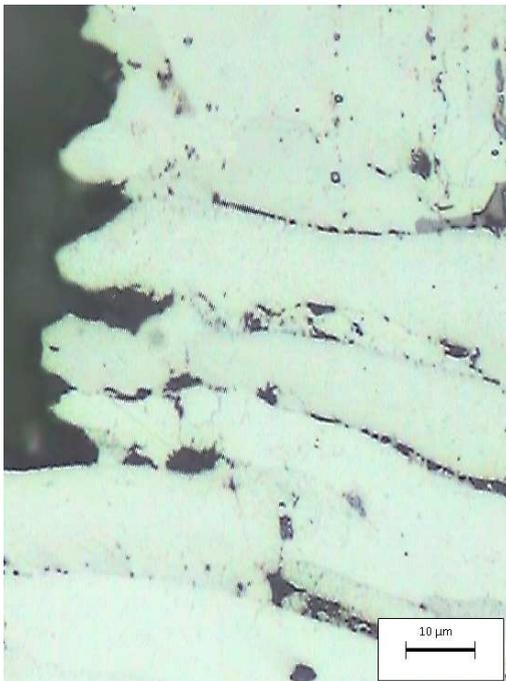
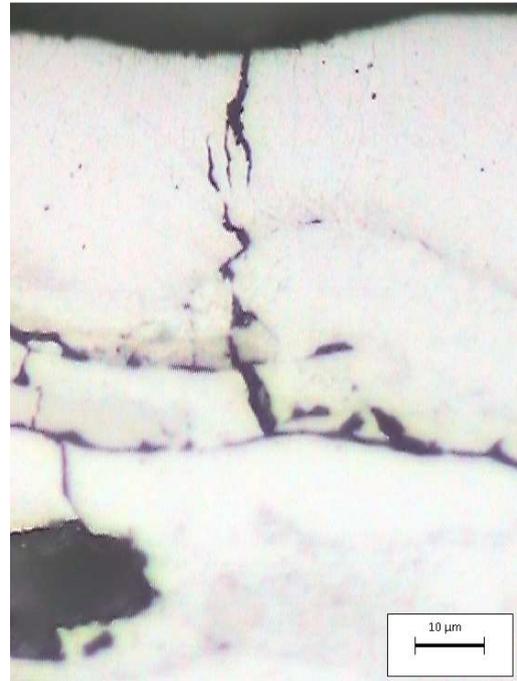
- Dépôts de molybdène sans couche d'accrochage



- Dépôts d'acier inoxydable 55 E avec couche d'accrochage



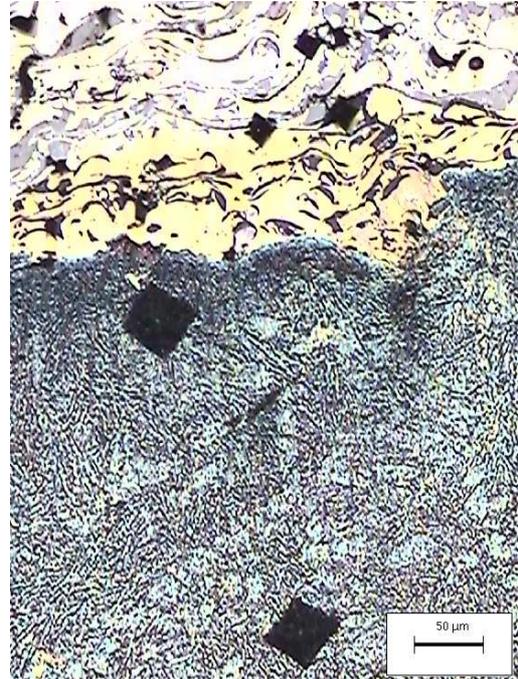
- Dépôts de molybdène avec couche d'accrochage



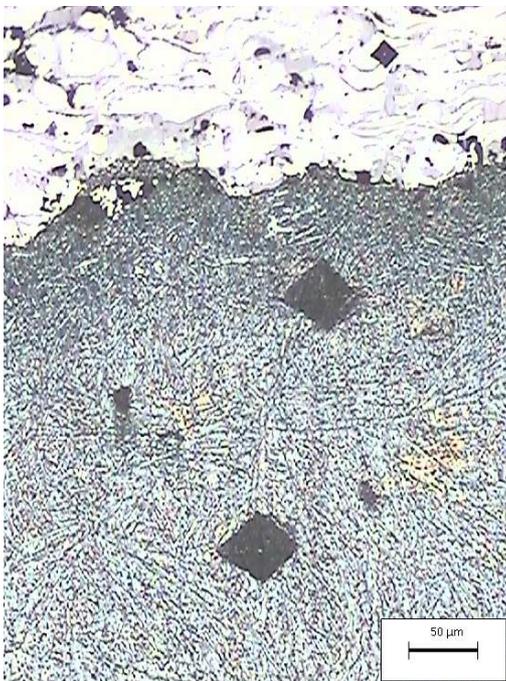
- Micrographies d'indentation (test de microdureté HV_{100grf})



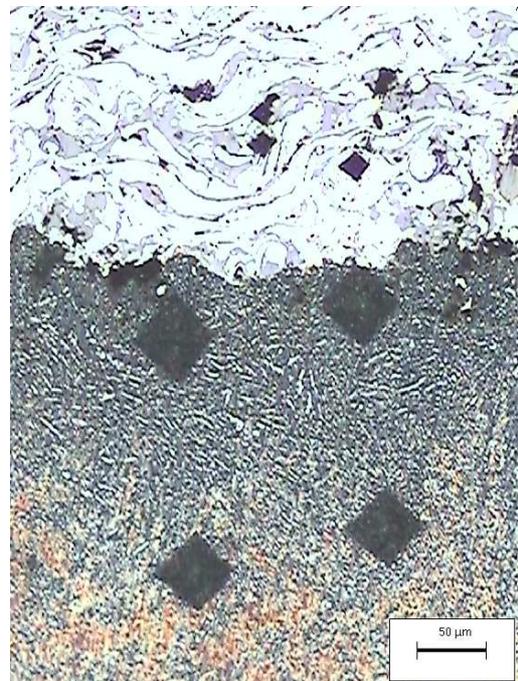
Dépôt de 259 µm d'épaisseur en acier inox 55 E avec couche d'accrochage



Dépôt de 701 µm d'épaisseur en acier inox 55 E avec couche d'accrochage



Dépôt de 787 µm d'épaisseur en acier inox 55 E sans couche d'accrochage



Dépôt de 905 µm d'épaisseur en acier inox 55 E sans couche d'accrochage



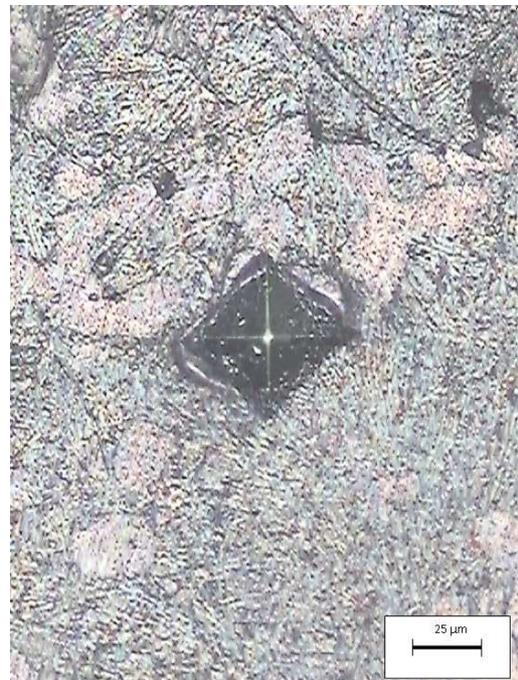
Dépôt de 308 μm d'épaisseur en molybdène avec couche d'accrochage



Dépôt de 715 μm d'épaisseur en molybdène avec couche d'accrochage



Substrat ayant subi une projection d'une couche d'accrochage



Substrat n'ayant subi aucune projection