

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Ecole Nationale Polytechnique.

Département de la métallurgie

PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

**ETUDE METALLOGRAPHIQUE DE COUPES
TRANSVERSALES DE DEPOTS OBTENUS PAR
METALLISATION SUR FONTE GRISE**

Proposé et dirigé par :

Professeur Essaid SALHI

Etudié par :

Lyes HASNAOUI

PROMOTION 2008

10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El-Harrach Alger Algérie

DEDICACES

A mon grand père

A mes chers parents

A ma grand-mère

A mon frère Mohamed Fodil

A mes sœurs Radia et Linda

A mes oncles et mes tantes

A toute ma famille

A mes amis

A tous ceux qui comptent pour moi,

REMERCIEMENTS

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

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

Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepté de siéger dans mon jury.

Je ne peux oublier de remercier tous les gens qui m'ont aidé à la réalisation de ce projet.

Résumé :

Le travail présenté dans cette thèse, est une recherche dans le domaine de la métallisation. La méthode de projection thermique adoptée ici est l'arc électrique. Pour cela, nous avons préparé des pièces en fonte grise sous forme de barreaux à structure ferritique et d'autre sous forme de médailles à structure lédéburitique pour confirmer les résultats.

D'abord, on a effectué une étude métallographique sur des pièces métallisées en acier inoxydable Z2CN18-10 et d'autres pièces métallisées aussi en acier inoxydable Z2CN18-10 mais en utilisant une couche intermédiaire de Ni-Al.

Ensuite, une étude comparative entre le substrat en fonte grise métallisé en inox seulement puis en inox en utilisant la couche intermédiaire du Ni-Al. Le résultat a montré que pour des conditions identiques de métallisation, l'utilisation de la couche d'accrochage de Ni-Al aide beaucoup à avoir une meilleure adhérence de l'inox et devient indispensable dans la métallisation moderne.

Finalement, on a appliqué des essais mécaniques sur ses pièces en tels que : l'essai de traction, l'essai de pliage et l'essai de micro dureté HV pour contrôler l'influence de la métallisation sur les propriétés mécanique des fontes grises. Enfin une observation au MEB suivie d'un profil de concentration des différents éléments.

Abstract

The work presented in this thesis, is a research in the field of metallization. The method of projection thermal adopted here is the electric arc. For that, we prepared castings gray in the form of bars with *ferritic* structure and of other in the form of medals with *ledeburitic* structure to confirm the results.

Initially, one carried out a metallographic study on parts metallized out of stainless steel *Z2cn18-10* and other parts also metallized out of stainless steel *Z2cn18-10* but by using an Nor-Al transition course.

Then, a comparative study only enters stainless the stainless grey pig iron substrate metallized then by using the transition course of Nor-Al. The result showed that for identical conditions of

metallization, the use of the tack coat of Nor-Al helps much to have a better adherence of stainless and becomes essential in modern metallization.

Finally, one applied mechanical tests to his parts in such as, the tensile test, the bending test and the test of micro hardness *HV* to control the influence of metallization on the gray properties mechanics of the pig iron and cast iron. Finally, an observation with the *MEB* followed by a profile of concentration of the various elements.

ملخص

هذا العمل المقدم في هذه المذكرة عبارة عن بحث في ميدان المعدنة، طريقة القذف الحراري المعتمدة هي القوس الكهربائي، لهذا قمنا بأعداد قطع حديد صلب رمادية على شكل أعمدة ذات بنية حديدية و أخرى على شكل أوسمة لها بنية *ledeburitique* لتأكيد النتائج.

أولاً، قمنا بدراسة ميتالوغرافية للقطع المعدنة بالحديد الصلب الغير المتأكسد $Z2CN18 - 10$ و قطع، أخرى تمعدنة بالحديد الصلب الغير المتأكسد $Z2CN18 - 10$ و لكن باستعمال طبقة وسيطية من $Ni - Al$. بعد ذلك، تمت مقارنة بين القطع المعدنة بالحديد الصلب الغير المتأكسد وحده و القطع المعدنة بالحديد الصلب الغير المتأكسد باستعمال طبقة وسيطية من $Ni - Al$. النتائج تبين أن في نفس شروط التمعدن، استعمال طبقة $Ni - Al$ تساعد كثيراً لأتحصل على إلتصاق جيد لألحديد الصلب الغير المتأكسد و هي لازمة في عملية التمعدن الحديثة.

أخيراً، قمنا بتجارب ميكانيكية على القطع، مثل، تجربة حول الحر، حول الصلابة *HV* لألسيطرة على تأثير التمعدن على الخصائص الميكانيكية لألمعدن المدروس. و أخيراً مشاهدة لـ *MEB* مرفق بتمثيل تراكيز مختلف العناصر.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<u>PARTIE THEORIQUE</u>	
CHAPITRE I : Projection thermique.....	2
I.1 Introduction.....	3
I.2 La préparation des surfaces.....	7
I.2.1 La propreté.....	7
I.2.2 La rugosité.....	7
I.2.3 Le préchauffage.....	8
I.3 Les modes de préparation.....	8
I.3.1 Le sablage.....	8
I.3.2 L'usinage.....	8
I.4 L'état du projectile.....	9
I.4.1 Les particules sont solides ou magmatiques.....	9
I.4.2 Les particules sont liquides.....	9
I.5 Le principe.....	10
I.6 La mécanique d'accrochage.....	10
I.7 Les procédés de la métallisation.....	12
I.7.1 A flamme oxy-gaz.....	12
I.7.1.1 Le pistolet à poudre.....	12
I.7.1.2 Le pistolet à fil.....	15
I.7.2 A arc électrique.....	17
I.7.3 A plasma d'arc.....	19
I.7.4 A détonation.....	22
I.7.4.1 Le canon à détonation "D-GUN".....	22
I.7.4.2 Canon à détonation "FARE-GUN".....	23
I.7.5 A système H.V.O.F.....	23
I.8 Comparaison des procédés.....	25

I.9 Les matériaux projetables utilisés.....	26
I.9.1 Le fil	26
I.9.2 La baguette	26
I.9.3 Le cordon souple.....	26
I.9.4 Le fil fourré.....	27
I.9.5 La poudre.....	27
CHAPITRE II : Les fontes.....	28
II.1 Définition.....	29
II.2 Composition des fontes.....	29
II.3 Modes d'obtention.....	30
II.3.1 Fontes de première fusion.....	30
II.3.2 Fontes de composition chimique définie.....	31
II.3.3 Fontes de seconde fusion.....	31
II.3.4 Fontes synthétiques.....	31
II.4 Différents types de fontes.....	31
II.5 Structure des fontes.....	32
II.6 Action des principaux éléments présents dans la fonte.....	32
II.7 Fontes blanches.....	33
II.8 Fontes grises.....	34
II.8.1 Structure.....	34
II.8.2 Influence du graphite.....	35
II.8.3 Influence de la structure de la matrice.....	35
II.8.4 Influence de l'épaisseur.....	35
II.9 Fontes malléables.....	35
II.9.1 fabrication et structure.....	35
II.9.2 fonte malléable à cœur blanc.....	36
II.9.3 fontes malléables à cœur noir.....	36
II.9.4 Fonte malléable perlitique.....	36

II.10 Fontes à graphite sphéroïdal.....	37
II.10.1 Elaboration.....	37
II.10.2 Désignation normalisée.....	38
II.10.3 Caractéristiques mécaniques.....	38
II.11 Fontes alliées ou spéciales.....	38
II.11.1 Fontes blanches.....	39
II.11.2 Fontes grises et GS.....	39

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III : Techniques expérimentales.....	40
III.1 Introduction.....	41
III.2 Analyse de la composition chimique.....	41
III.3 L'opération de la Métallisation.....	42
III.4 Caractérisation.....	44
III.4.1 Caractérisation microstructurale.....	45
III.4.1.1 Préparation des échantillons.....	45
III.4.1.2 Attaque chimique.....	45
III.4.1.3 Observation microscopique.....	45
III.4.1.3.1 Microscopie Optique.....	45
III.4.1.3.2 Microscopie Electronique à Balayage.....	46
III.4.1.3.3 Analyse ponctuelle par EDX.....	46
III.4.2 Caractérisation mécanique.....	47
III.4.2.1 Essai de traction.....	47
III.4.2.2 Essai de pliage.....	50
III.4.2.3 Essai de micro-dureté.....	50
 CHAPITRE IV : Résultats et discussions.....	 52
IV.1 Analyse quantitative et qualitative.....	53
IV.2 Essai de traction.....	63

IV.3 Essai de pliage.....	67
IV.4 Essai de micro dureté.....	68
Conclusion générale.....	70
Références bibliographiques.....	72

INTRODUCTION GENERALE

Différentes technologies de dépôt et traitements de surface permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface.

Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (PVD et CVD) et la projection thermique.

Ces traitements de surface jouent un rôle fondamental dans la maintenance et la prévention des pièces mécaniques. Leur aspect économique est considérable dans la lutte contre la corrosion et l'usure.

Le but de ce mémoire est d'étudier l'adhésion des produits métallisés sur la fonte grise à matrice ferritique et à matrice lédeburitique.

Ainsi, on a procédé à la métallisation par fusion d'un fil à l'arc électrique projeté à l'air comprimé sur le substrat.

Les produits de métallisation étant de l'inox pour le premier cas et un alliage de Ni-Al + inox pour le deuxième cas.

Le but étant de prendre connaissance de l'adhésion avec le substrat et d'étudier l'interface.

Pour cela on a utilisé, la métallographie, une filiation de micro dureté, un profil de concentration des différents éléments à travers le substrat et les différents produits de métallisation.

La rédaction de ce mémoire a été présentée sur la base de quatre chapitres dont le premier a pour but de prendre connaissance de l'historique de la métallisation, les techniques de préparation et les procédés ainsi que les différentes applications.

Le deuxième chapitre présente les différentes fontes et l'influence des éléments chimiques.

Le troisième chapitre illustre les techniques expérimentales utilisées et le quatrième chapitre a été prévu pour l'interprétation des résultats.

CHAPITRE I : PROJECTION THERMIQUE

I.1 Introduction :

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés de revêtement de surface, pour lesquels un matériau d'apport est fondu par une source de chaleur, puis projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. En principe, tout matériau dont la température de fusion est séparée d'au moins 300°C de la température de décomposition ou de vaporisation, peut être projeté. Pour améliorer l'adhérence du revêtement, le substrat peut être maintenu à une température inférieure à 150°C pendant l'opération de déposition. L'épaisseur du dépôt constitué par l'empilement des particules, sous forme de lamelles, est généralement de quelques dizaines de microns.

Les propriétés du dépôt dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat. Les paramètres des particules à l'impact sont leur vitesse, leur température, leur état de fusion, leur taille, leur état chimique. Ils dépendent directement de l'écoulement du jet et des conditions d'injection du matériau dans celui-ci. Les paramètres du substrat sont, sa nature, sa rugosité, son état chimique de surface et sa température avant, pendant et après le dépôt. [1,2]

Les techniques de projection thermiques se développent suivant trois axes [3] :

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

Des exigences et objectifs conditionnent l'utilisation des traitements de surface (figure 1) tel que :

- L'amélioration de l'aspect ;
- La conductibilité et l'isolation électrique ;
- La conductibilité et l'isolation thermique ;
- L'amélioration des caractéristiques de glissement ;
- La soudabilité ;
- La modification des propriétés optiques ;
- L'anti-oxydation à haute température.

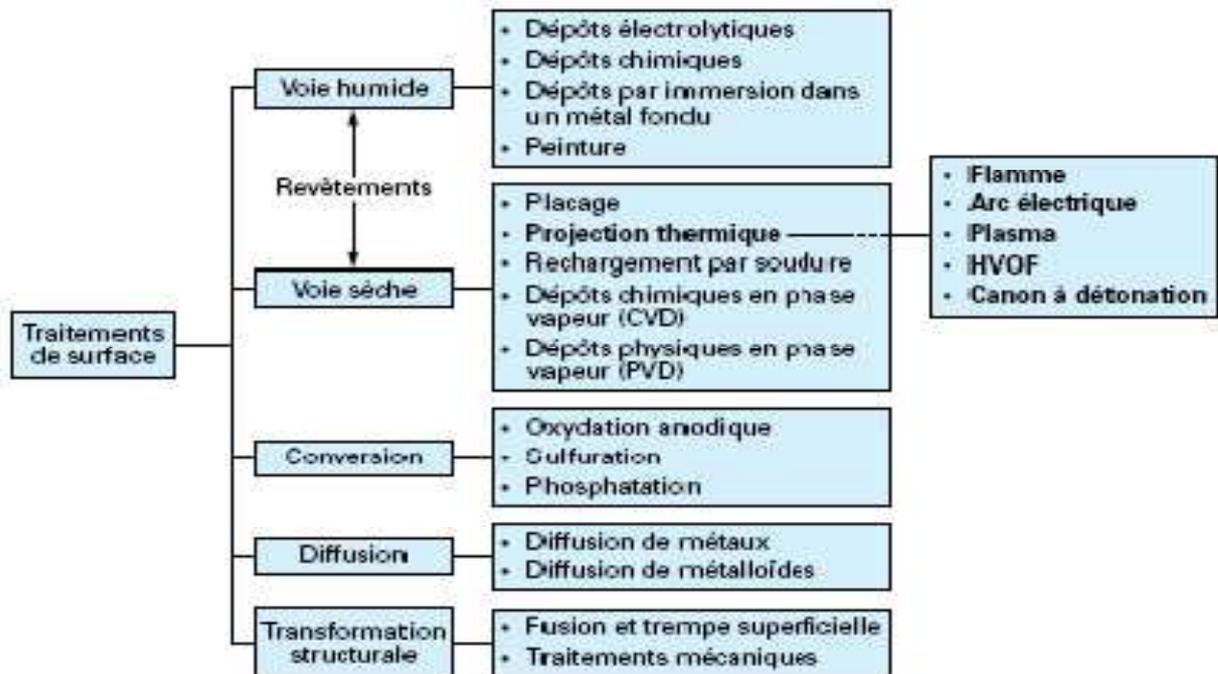


Figure 1 : Place de la projection thermique dans les traitements de surface [1]

Origine de la métallisation :

➤ Les impacts de balles :

Tout commence au début du 20^{ème} siècle, vers 1909, lorsqu'un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur **Max Ulrich Schoop**, constate des traces de plomb laissées par l'impact d'une balle sur un mur.

L'idée germa dans son esprit de créer un revêtement par projection de métal fondu. En effet, si le plomb avait adhéré au mur, c'était dû à sa fusion instantanée au contact de ce dernier. La force vive du corps lancé à grande vitesse, se transformant en chaleur au moment de l'impact.

Mais ce phénomène, ne pouvait s'obtenir qu'avec des métaux dont le point de fusion était relativement bas.

Afin de pouvoir projeter tous types de métaux, **Schoop** eut alors l'idée de faire fondre le métal avant de le projeter dans cet état sur les pièces à traiter.

Il n'y avait plus d'obstacle théorique, il restait à passer à la pratique.

Le "revêtement de surface par projection thermique" était né, plus connu par la suite sous le nom de "métallisation". [1]

Histoire de la métallisation :

➤ Le système original Schoop :

Construisit les premiers appareils à métalliser basés sur son principe. Ils étaient composés d'un creuset, où le métal fondu était maintenu à l'état liquide par un système de chauffage et d'un appareil de projection, fonctionnant à l'aide d'un fluide, tel que l'air, préalablement réchauffé.

Mais outre que l'appareil était absolument intransportable, il se heurtait à des difficultés considérables.

Notamment, celle de maintenir le métal suffisamment chaud et fluide, pendant son transport et sa projection. Ainsi que la destruction rapide des tuyères et des buses.

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

La **métallisation** avait donc fait un premier pas important.

➤ L'évolution du système :

Mais cette solution n'était pas parfaite, car il était impossible de fondre correctement des poudres métalliques à haut point de fusion. De plus l'entraînement régulier de la poudre était difficile à obtenir, que ce soit par soufflage ou par aspiration à partir d'un réservoir. Malgré l'adjonction de vibreur pour éviter les tassements, la poudre s'agglomérait interdisant une régularité parfaite.

Les conséquences étaient une poudre trop brûlée, lors d'un passage trop faible dans le chalumeau, ou une poudre mal fondue lors d'un passage par excès. Résultat, les revêtements étaient peu homogènes et d'une adhérence douteuse.

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

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

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

Historique du schoopage :

➤ Les brevets :

Au début des années **1900**, **Max Ulrich Schoop** invente la projection thermique et faisant des expériences de pulvérisation de métal fondu (plomb) pour réaliser des enduits protecteurs.

En **1909**, **Schoop** dépose son premier brevet couvrant l'utilisation d'un processus permettant de projeter du métal fondu vers un substrat, défini comme: "processus pour fondre des matériaux dans une zone de chauffage et de les propulser en état fondu et ou ramolli par chaleur, sur une cible pour former un enduit".

En **1912**, **Schoop** remplace la poudre de métal par un fil métallique. Il incorpore un chalumeau sur l'appareil de projection. La métallisation fait un grand pas en avant.

En **1914**, les premières applications industrielles de ces matériels sont faites, d'abord dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), puis dans celui de l'anticorrosion (dépôt d'aluminium) et celui de la décoration (dépôt de bronze).

En **1915**, **Schoop** fait des expériences concluantes sur la projection par arc électrique entre deux fils. Il dépose un brevet sur son principe.

➤ La récompense :

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

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

➤ Le développement :

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

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

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

Depuis, la recherche de propriétés de surface spécifiques pour des pièces utilisées dans des conditions de plus en plus sévères, en particulier dans les industries aéronautique et mécanique, a conduit au développement de nouveaux procédés de projection thermique, tels que **le plasma d'arc**, **le canon à détonation** et **la flamme supersonique** (procédé HVOF). [1,2]

I.2 La préparation des surfaces :

La métallisation pour être efficace, exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le substrat, cet accrochage reste toujours très insuffisant.

En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement.

Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir:

- une propreté qui est un état chimique
- une rugosité qui est un état physique
- un préchauffage éventuel.

I.2.1 La propreté :

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit. Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres).

La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire à l'adhérence du métal d'apport.

Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

I.2.2 La rugosité :

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface.

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, provoqué par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage.

Dans les deux cas, le résultat à effet :

- d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.
- de créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer.

La rugosité est complémentaire de la propreté.

I.2.3 Le préchauffage :

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur. Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteint. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement.

I.3 Les modes de préparation :

Il existe deux grandes applications dans le domaine de la métallisation :

- celui dit du "**revêtement anti-corrosion**",
- celui dit du "**rechargement mécanique**".

Suivant le traitement recherché, la préparation de surface va différer pour être, soit:

- un sablage dans l'anti-corrosion,
- un usinage dans le rechargement.

I.3.1 Le sablage :

Le sablage est le terme impropre donné au "traitement par impacts", plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement d'une surface par des projectiles petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au subjectile.

La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une force centrifuge (turbine) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles).

Le "**grenailage**" met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat.

Il reste à ce jour la seule solution efficace.

I.3.2 L'usinage :

La préparation de surface par enlèvement de métal répond à 3 volontés:

- créer sur la surface un réseau de résistance aux sollicitations mécaniques qui seront exercées sur le dépôt de rechargement.
- augmenter la rugosité et simultanément la surface d'accrochage.
- diminuer les dimensions de la pièce (dans le cas de réparation de pièces usées) afin de laisser une épaisseur suffisante pour le futur dépôt, tout en respectant les cotes limite de rupture.

Que la forme de la pièce soit cylindrique ou plane, l'adhérence de la couche de métal projeté est mécanique et devra résister aux efforts de glissement et d'arrachement par rapport à son support.

Pour les pièces de révolution, cet usinage sera exécuté sur un tour sans aucune lubrification. Le revêtement formant une surface continue résistera bien aux efforts en tous genres. Pour les pièces planes, cet usinage sera exécuté sur une fraiseuse ou un étau-limeur. Le revêtement ne formant pas une surface continue, puisque interrompu aux extrémités, il faudra obtenir un profil de surface légèrement bombé (convexe) pour accroître l'adhérence. Dans certains cas, on pourra effectuer un sablage fin sur les parties usinées afin d'augmenter la rugosité de la surface. [1,2]

I.4 L'état du projectile :

Suivant les paramètres ci-dessus, on peut constater que le support peut recevoir des particules en état solide, magmatique (pâteux) ou liquide, dont l'accrochage va différer suivant que:

I.4.1 Les particules sont solides ou magmatiques :

Lorsque la température de fusion du métal d'apport est inférieure ou égale à celle du support, les particules en s'écrasant sur la surface vont se réchauffer par la transformation de l'énergie cinétique en chaleur au moment de l'impact. La liaison mécanique avec le support par fusion localisée, sera alors possible si la surface à traiter a été préalablement préparée.

Lorsqu'au contraire la température de fusion du projectile est supérieure à celle du support et qu'il y a affinité entre les deux métaux, on obtiendra par diffusion la formation d'un alliage en surface.

I.4.2 Les particules sont liquides :

Dans ce cas, lorsque la température à l'impact est proche de la température de fusion du support, on obtiendra une liaison superficielle à condition qu'il y ait affinité entre les deux matériaux considérés.

Donc avec un acier projeté par un pistolet à flamme sur un support également en acier, on obtiendra un accrochage purement mécanique. Alors qu'avec ce même acier projeté par un arc électrique sur le même support, on obtiendra des zones de liaison ponctuelles entre les deux matériaux.

Mais la température des particules projetées avec un arc électrique étant plus importante qu'avec la flamme, il en résultera un accroissement de la vitesse d'oxydation avec l'oxygène de l'air pendant le transfert. Le métal ainsi projeté subira des modifications plus importantes. Dans tous les cas, il faut impérativement que les surfaces à traiter soient soigneusement préparées pour recevoir le revêtement, afin d'optimiser son accrochage. [2]

I.5 Le principe :

Le métal d'apport solide, qui peut se présenter sous forme de fil ou poudre, est fondu au moyen d'une source de chaleur importante, provenant de la flamme d'un chalumeau oxyacétylénique, ou d'un arc électrique. Réduit à l'état liquide, il est ensuite pulvérisé sous forme de gouttelettes et véhiculé à grande vitesse au moyen d'un vecteur gazeux. Ce dernier est généralement de l'air comprimé, mais peut aussi être de l'argon, ou de l'azote, mélangé au gaz provenant de la combustion des gaz (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz (plasma d'arc).

La vitesse des particules pulvérisées est de l'ordre de **100 à 200 m/sec** pour les pistolets à gaz et supersonique pour les pistolets à plasma d'arc. Sous l'effet de ces grandes vitesses, les particules viennent s'écraser sur le support à traiter, situé à une distance comprise entre **150 et 250 mm**. Durant le trajet de la buse au projectile, les particules se refroidissent légèrement et peuvent se présenter dans un état magmatique (pâteux, du moins en périphérie), au moment de l'impact. Sous le choc, le métal va être écroui et martelé par les particules suivantes qui en s'écrasant vont se souder entre elles. Le dépôt se présente donc sous la forme d'un amas, apparemment compact, de particules liées entre elles de façon mécanique. Figure I.1

I.6 La mécanique d'accrochage :

L'accrochage s'obtient de différentes façons, suivant que le support est tendre ou dur. Dans le premier cas, sous l'effet du choc, les particules pénètrent dans la couche superficielle du support et s'y accrochent, réalisant ainsi une bonne adhérence du revêtement.

Dans le second cas, tout va dépendre de l'état des particules au moment de l'impact. Cet état est fonction de la nature même du métal d'apport et du mode de fusion adopté pour fondre ce métal.

En effet, avec l'utilisation de poudre et particulièrement dans le cas d'une fusion par flamme oxy-gaz, une certaine quantité de celle-ci peut passer au travers de la source de chaleur sans être fondue.

Ce n'est pas le cas avec les fils nus ou baguettes enrobées, dont le métal constitutif est toujours porté à fusion au départ de la buse de projection.

Pour le mode de fusion, les pistolets à flamme oxy-gaz permettent d'obtenir des particules fondues à des températures voisines de la température de fusion du métal d'apport, ce qui permet d'envisager qu'elles atteignent le support dans un état relativement liquide. Le résultat est sensiblement identique pour les pistolets à plasma d'arc alimentés en poudre, du fait d'un passage très court du produit dans la zone de fusion à haute température.

Par contre, pour un système à arc électrique, la température des particules fondues est beaucoup plus élevée (de l'ordre de 2000°), ce qui permet de penser qu'elles arrivent encore à l'état liquide sur la surface du support.

Les particules en fusion sont projetées par air comprimé, l'O₂ de l'air associé aux particules fusionnées conduit à la formation d'oxydes métalliques qui augmentent la dureté du dépôt.

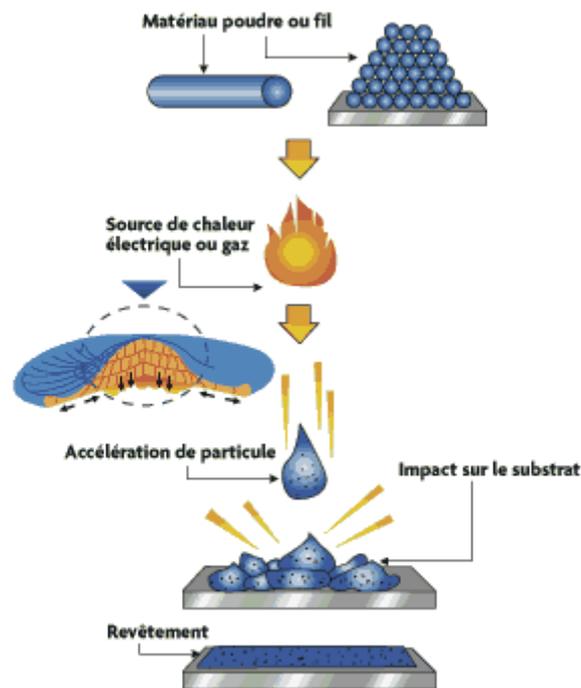


Figure I.1 Schéma du principe de la projection thermique. [2]

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est de type lamellaire [4,5] comme c'est décrit dans la figure I.2.

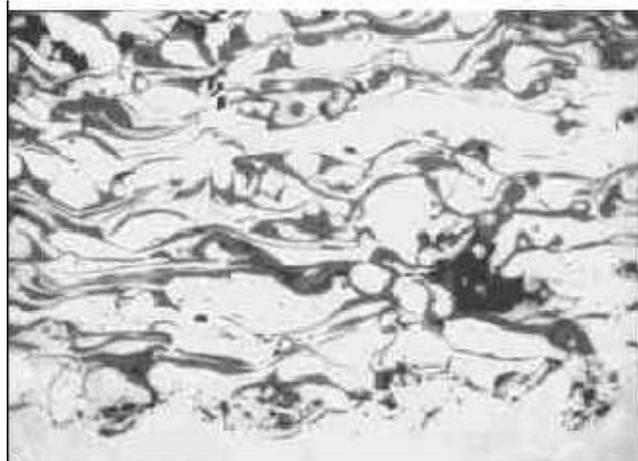


Figure I.2 : Microstructure d'un dépôt projeté thermiquement [5]

I.7 Les procédés de la métallisation :

On peut séparer les procédés de projection thermique en deux familles, selon la source de chaleur utilisée: flamme ou arc électrique. [6]

I.7.1 A flamme oxy-gaz :

I.7.1.1 Le pistolet à poudre:

Ce procédé est sans conteste le plus simple des procédés de projection thermique. Il utilise l'énergie d'une réaction chimique. Son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de poudre, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion. (Figure I.3)

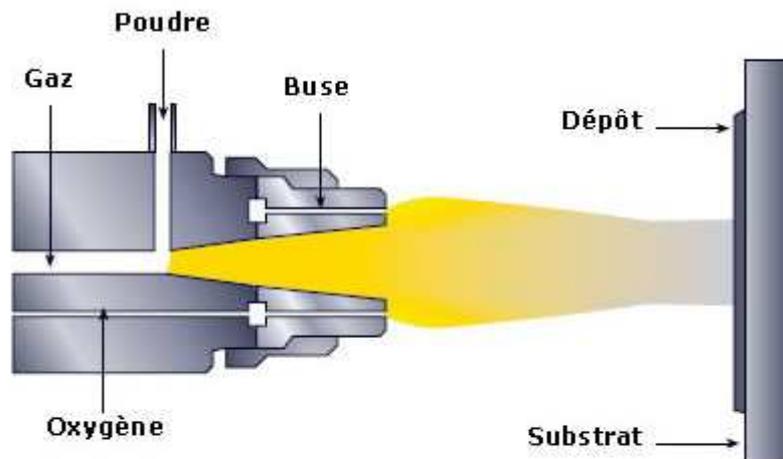


Figure I.3 Schéma de principe de la projection thermique de poudre [7]

Le pistolet de projection est équipé d'un chalumeau oxy-gaz de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion (en général un mélange oxy-acétylène ou oxy-propane).

La poudre est distribuée en son centre par gravité.

a) distributeur par gravité:

Le réservoir à poudre, placé directement au dessus, ou sur le pistolet. La poudre contenue dans ce récipient tombe par gravité directe au centre du chalumeau, ou est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un des deux gaz de combustion. Ce procédé est aussi appelé torche à gaz. Figure (a)

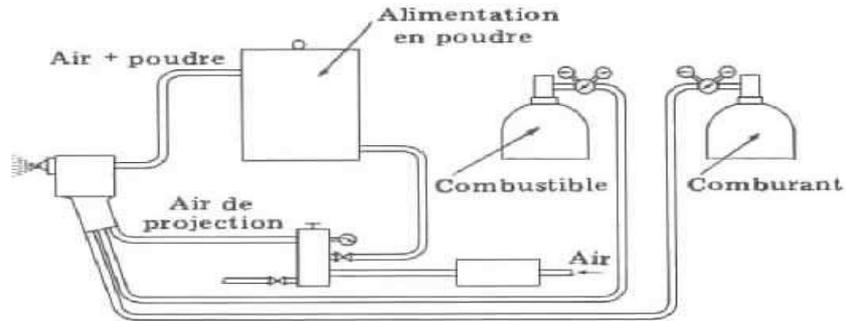


Figure (a) Schéma d'une installation complète de projection de poudre par flamme [2]

b) distributeur par pression:

Un réservoir fermé, situé à proximité du pistolet, est équipé en partie basse d'un distributeur de poudre alimenté en air comprimé. La poudre est véhiculée jusqu'au pistolet par un tuyau et propulsée sur le substrat par le vecteur d'air comprimé. Le dispositif peut-être complété par un vibreur ou une vis d'Archimède afin d'assurer une plus grande régularité de l'écoulement du produit. Figure (b)

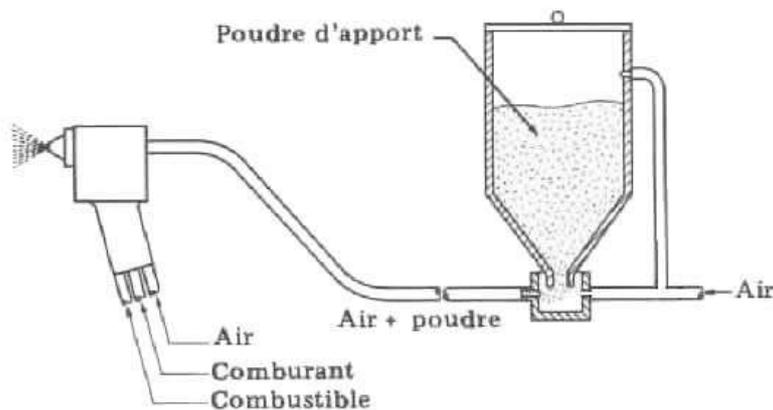


Figure (b) Schéma de principe de la distribution de poudre par pression [2]

c) distributeur par dépression:

Le réservoir est muni d'un dispositif à dépression composé d'une canne d'entrée d'air et d'un suceur relié au dispositif d'aspiration. L'effet GIFFARD, produit par un courant d'air comprimé traversant un système convergent-divergent, permet d'entraîner la poudre jusqu'au pistolet. Figure©

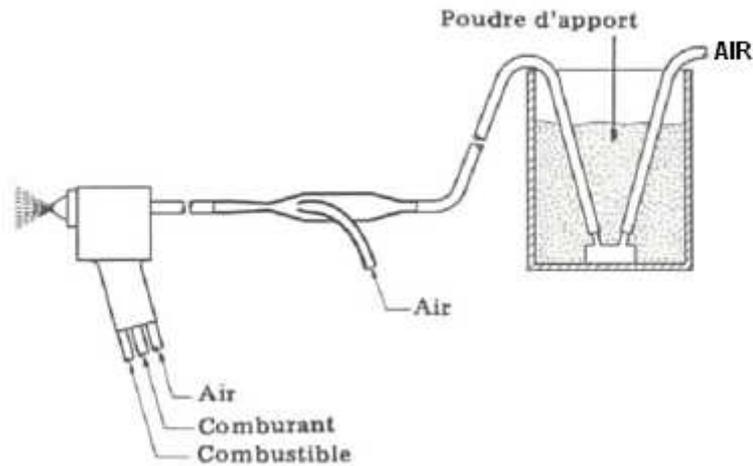
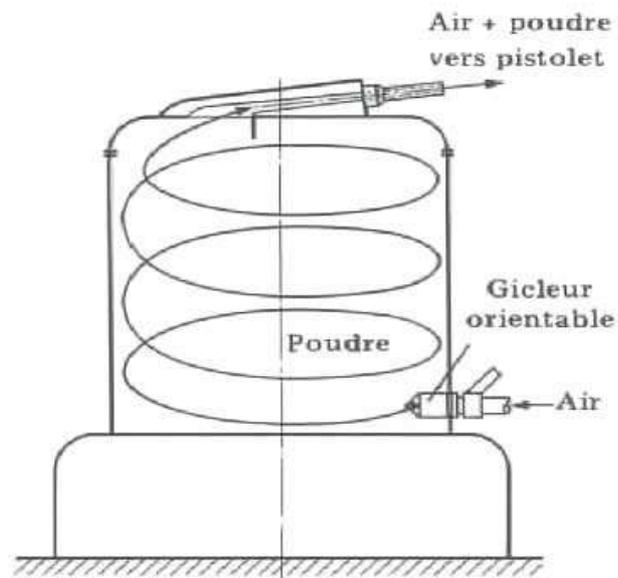


Figure © Schéma de principe de la distribution de poudre par dépression [2]

d) distributeur par cyclone :

Le réservoir à poudre est équipé d'un système cyclonique. Le mouvement tourbillonnaire qui met la poudre en suspension, est assuré par un courant d'air, qui permet de véhiculer celle-ci jusqu'au pistolet de projection. Figure d



Figure(d) Schéma de principe de distribution de poudre par cyclone [2]

➤ Les applications :

• La projection :

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

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (30 à 50 m/s). C'est pourquoi elles sont souvent accélérées par un vecteur d'air.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 150 mm pour le pistolet à flamme et 80 à 100 mm pour la torche à gaz. Ceci afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment important pour être fondues dans la flamme.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur à des taux horaires de dépôt de 2 à 3 kgs/h, sans échauffement important du substrat ($T < 250^\circ\text{C}$).

• Les dépôts :

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

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

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

• Les utilisations :

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

I.7.1.2 Le pistolet à fil:

Comme pour le procédé à flamme-poudre, son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et à le projeter sur le substrat. Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu.

Figure I.4. [6]

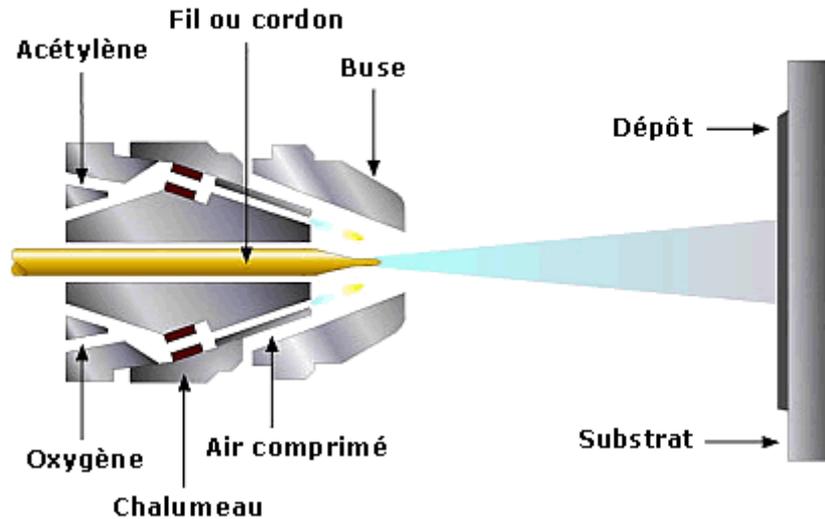


Figure I.4 Schéma de principe de la projection thermique à flamme-fil ou cordon [7]

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

Il se compose de deux parties distinctes:

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

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

Dans le cas d'entraînement par turbine à air comprimé, il est nécessaire de passer par un réducteur de vitesse, de manière à communiquer aux molettes un mouvement suffisamment lent.

La vitesse d'avance peut varier entre **0,5 et 12 m/mn** pour les pistolets portatifs.

Cependant, les types d'entraînement cités ci-dessus s'avèrent insuffisants pour effectuer des dépôts importants, ou lorsqu'on est tenu à des réglages précis de défilement lent, pour l'utilisation de cordons ou baguettes en matériaux réfractaires par exemple. Pour réaliser des rechargements massifs, généralement effectués avec des gros fils rigides qui nécessitent de gros efforts d'entraînement, on utilise des moteurs électriques capables de tirer des fils jusqu'à **5 mm** de diamètre. Ces moteurs sont généralement dissociés du pistolet et reliés à ce dernier par un flexible. [1,2]

➤ Les applications :

• La projection :

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

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

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

• Les dépôts :

Tous les matériaux peuvent être projetés avec ce procédé, qu'ils soient tréfilables (sous forme de fil) ou non (sous forme de baguette), ou en poudre (sous forme de cordon). Ces différents conditionnements, permettent des dépôts de toutes sortes et la possibilité d'utiliser un pistolet à flamme-fil pour projeter des alliages auto fusibles. L'accrochage du dépôt sur le support se fait de façon mécanique. Mais après une projection d'alliages auto fusibles, il est possible de refondre le dépôt afin de le lier métallurgiquement à son support.

• Les utilisations :

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

I.7.2 A arc électrique :

Son principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables d'un métal d'apport. Le métal fondu dans l'arc est ensuite atomisé et propulsé par un jet d'air comprimé sur le substrat.

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

Les deux fils sont chargés électriquement avec des polarités opposées et alimentés ensembles pour maintenir un arc constant. (Figure I.6). [1,2]

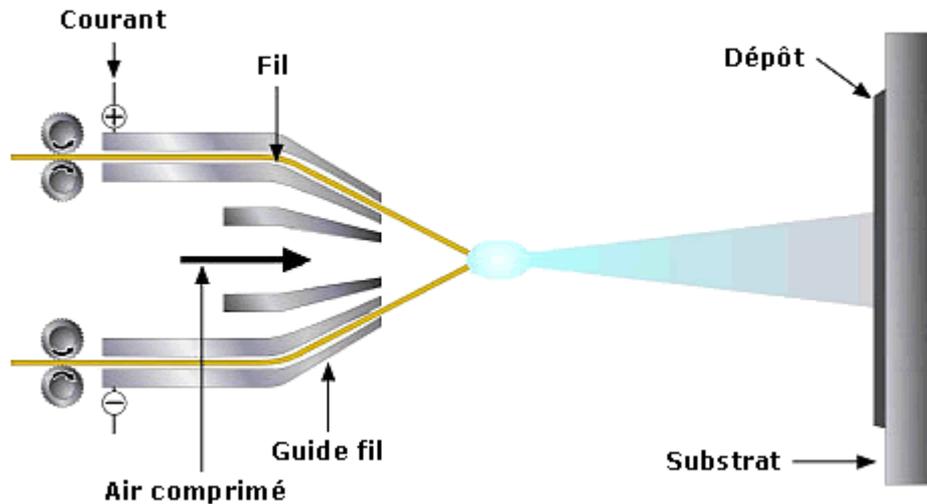


Figure I.6 Schéma de principe de la projection thermique à arc électrique [7]

Il est essentiellement constitué de deux parties distinctes:

- la première sert à l'entraînement des fils,

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

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

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

Une buse située derrière le point d'intersection des fils, dirige un flux de gaz comprimé à grande vitesse sur l'extrémité des fils en fusion, et propulse le matériau atomisé sur le substrat. [4]

➤ **Avantages et utilisations :**

• **Caractéristiques :**

La température de l'arc, d'environ **6000K** dans l'air à pression ambiante, est largement au dessus du point de fusion des matériaux projetés. Ceci peut entraîner une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. Cependant, cette dernière

peut aider à créer des zones d'interaction métallurgiques dans le dépôt ou à l'interface dépôt/substrat et des zones de diffusion, améliorant ainsi sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts.

- **Avantage :**

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

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

- **Utilisations :**

La projection par arc électrique présente un meilleur rendement de dépôt par rapport aux autres procédés de projection, mais elle nécessite des matériaux conducteurs électriques et tréfilables. La plupart des matériaux métalliques tels que le Zinc, le Cuivre, l'Aluminium, le Bronze, l'Acier, le Molybdène, ainsi que de nombreux alliages peuvent être projetés par cette technique.

En raison d'une température d'arc élevée, la variété des matériaux métalliques déposables n'est limitée qu'à la fabrication des fils. Néanmoins, l'emploi de fils fourrés ductiles, permet la projection d'alliages complexes et de composites techniques.

Les domaines d'applications sont l'anticorrosion et les rechargements, surtout pour les dépôts durs. [2]

I.7.3 A plasma d'arc :

Bien que les termes de "flamme plasma" ou "jet de plasma" soient souvent utilisés, il s'agit en réalité d'un "plasma d'arc". Le plasma d'arc est une atmosphère fortement dissociée et ionisée, conductrice d'un courant d'électricité. Si les manuels scientifiques en donnent des définitions très compliquées, il faut savoir que dans tout arc électrique on trouve une gaine de plasma dont l'application n'est pas nouvelle. Elle a largement été exploitée en soudage haute température, comme la flamme des torches à hydrogène atomique qui en est très riche.

Mais l'énergie du plasma n'a de valeur que si elle est canalisée. Et c'est l'allemand **H. Gerdein** qui en développa le concept les années 20.

La source de chaleur utilisée est un plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène. Le gaz, qui ne se trouve plus sous sa forme gazeuse, mais à l'état plasma, produit alors de hautes températures. La particularité de ce système de projection, est la très

forte constriction imposée à l'arc, qui permet d'atteindre dans le plasma des températures très élevées, de l'ordre de **10000 à 15000°K**. Tous les matériaux y compris les plus réfractaires, peuvent ainsi être fondus.

L'expansion du flux gazeux permet d'atteindre en sortie de tuyère des vitesses d'éjection très élevées, puisqu'elles peuvent dépasser la vitesse du son. Elles sont comprises entre **800 et 1200 m/s**, suivant la densité du plasma et la nature des gaz. Ce qui permet d'obtenir une bonne fusion et un bon étalement des particules à l'impact, qui elles, sont projetées à des vitesses de l'ordre de **200 à 250 m/s** sur le substrat. Figure I.6

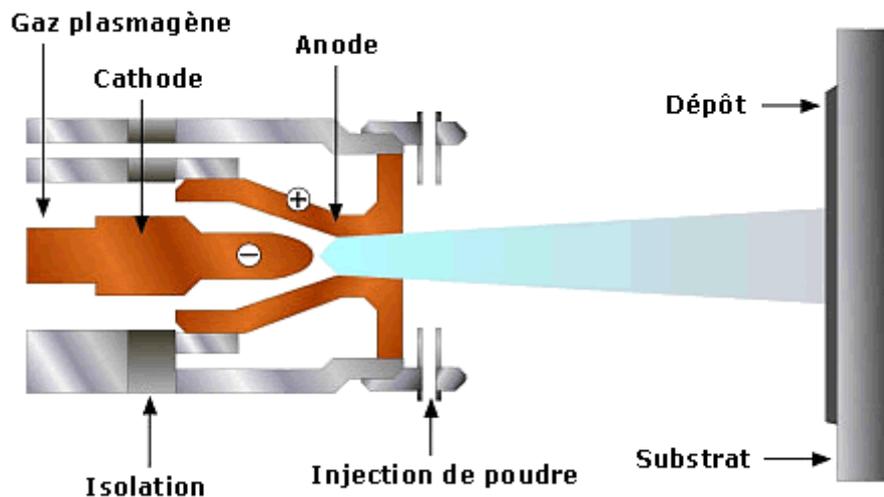


Figure I.6 Schéma de principe de la projection thermique à plasma d'arc [7]

➤ **Fonctionnement :**

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

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

La projection plasma comporte deux techniques différentes soit:

a) La projection par arc soufflé (utilisée surtout en métallisation courante).

C'est un plasma à arc interne dans lequel le jet de plasma ne conduit pas le courant électrique à l'extérieur de la tuyère. La projection peut se faire dans l'air ambiant (ASP: Air Plasma Spraying) ou sous vide partiel (VPS: Vacuum Plasma Spraying). (Figure (a1))

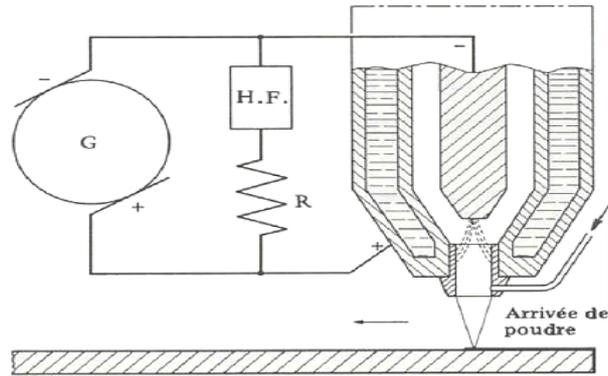


Figure a1 Schéma de principe du plasma d'arc soufflé [2]

b) La projection par **arc transféré** (utilisée surtout en rechargement).

C'est un plasma à arc externe dans lequel le jet de plasma est entièrement parcouru par le courant électrique. Le circuit se referme sur la pièce à traiter, qui sert d'anode extérieure alors que la tuyère est portée à un potentiel intermédiaire. Figure b1

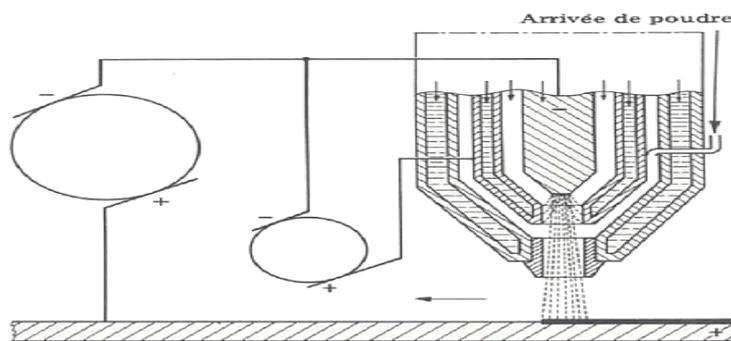


Figure b1 Schéma de principe de plasma d'arc transféré [2]

➤ Utilisation, avantages et applications :

• Utilisation :

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

- **Avantages et applications :**

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

Les secteurs d'applications sont variés. On retrouve la projection plasma dans les domaines de l'aéronautique (civil ou militaire), de l'aérospatiale, de l'énergie (pile à combustible, pétrochimie), des mines, de l'impression et de la pâte à papier, de l'industrie du verre, de l'automobile, dans le secteur médical et dans la protection des chocs thermiques comme les barrières diélectriques. [4]

I.7.4 A détonation :

I.7.4.1 Le canon à détonation "D-GUN" :

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

➤ **Fonctionnement :**

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

Les arrivées des gaz sont commandées par des électrovannes dont les temps et durées d'ouverture sont prédéterminés. La poudre est fondue et éjectée à très grandes vitesses, près de **3 km/s** par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa et une température au dessus de **4000°C**. Le régime de projection de ce système est discontinu. Figure I.7

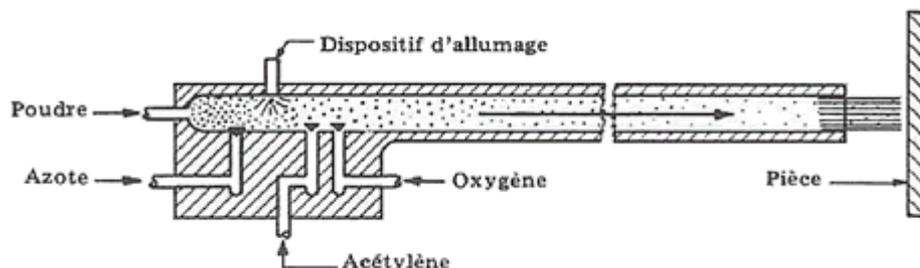


Figure I.7 Schéma de principe du fonctionnement d'un canon à détonation [1]

➤ Applications :

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

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

1.7.4.2 Canon à détonation "FARE-GUN" :

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

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

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

Cet appareil entièrement automatique, peut projeter des matériaux identiques au D-Gun, ainsi que des alliages métalliques tels que Nickel-chrome-aluminium ou Nickel-aluminium. [1,2]

1.7.5 A système H.V.O.F :

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

➤ Fonctionnement :

Le processus utilise pour combustible une combinaison de l'Oxygène (comburant) avec divers gaz (carburants), comme l'Hydrogène, le Propylène, le Propane, le Méthane, le Kérosène.

Le principe est basé sur une réaction de combustion à haute pression (0,5 à 0,7 MPa en moyenne) dans une chambre prévue à cet effet. Il en résulte une flamme caractérisée par une température comprise entre **2500** et **3200°C** et des écoulements gazeux très énergétiques et extrêmement rapides (plusieurs fois la vitesse du son). Les poudres à pulvériser sont injectées, par un gaz porteur neutre, axialement dans les gaz chauds en extension, où elles sont fondues à des températures comprises entre **1500** et **2500°K**. Elles sont alors accélérées au travers d'une tuyère "**convergente-divergente**" et propulsées à des vitesses comprises entre **300** et **600 m/sec**.

Le pistolet de projection est refroidi par un circuit d'eau, concentrique à la chambre de combustion et la tuyère d'éjection. Figure I.8

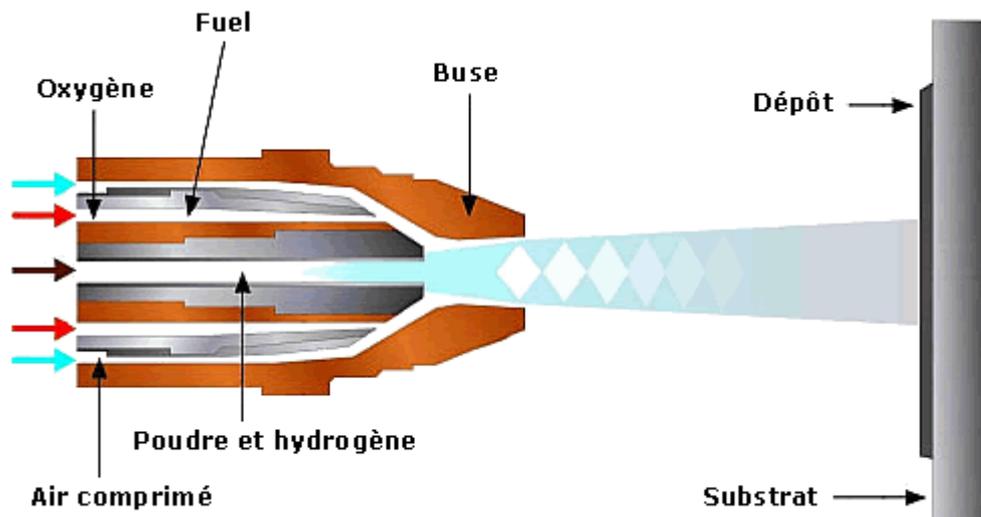


Figure I.8 Schéma de principe de la projection thermique du système H.V.O.F [7]

➤ Applications :

Ce procédé est principalement utilisé pour projeter des métaux (Inox, Chrome, Molybdène), des alliages de métaux, des alliages auto-fusibles, des carbures et des cermets ou des céramiques. Les applications sont les protections anticorrosion et anti-usure, avec la possibilité de réaliser des dépôts de fortes épaisseurs (en plusieurs passes), dont la densité obtenue approche la densité théorique du matériau d'apport. [1,2]

I.8 Comparaison des procédés :

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques particulières à chaque procédé de projection, sachant que le choix doit se faire en tenant compte du résultat à obtenir et des paramètres énoncés. [7]

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

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

I.9 Les matériaux projetables utilisés :

La grande diversité des matériaux projetables, permet à la "projection thermique" de s'étendre sur un large domaine d'applications et dans de nombreuses industries pour :

- la protection contre la corrosion,
- le rechargement après usure,
- les solutions d'isolation ou de conductibilité,
- l'amélioration des propriétés mécaniques,
- la réalisation de formes et d'objets artistiques.

A chaque application, correspond un matériau projetable adéquat, qui peut remplir plusieurs fonctions à la fois. Ces matériaux, ou produits, se présentent sous différents aspects, soit par obligation, s'ils ne sont pas tréfilables, soit afin de pouvoir les adapter aux différentes techniques de projection. Cet aspect peut être:

- en forme de fil (bobine ou couronne)
- en cordon souple (poudre enrobée)
- en poudre ou granulats (récipient)

I.9.1 Le fil :

Le matériau doit impérativement être tréfilable. C'est le cas de la plus part des produits métalliques projetables. Une fois fabriqué, il est conditionné en bobine, en couronne ou en fût. Sa longueur et son diamètre sont variables.

- 1,5 - 2 - 3 - 4 ou 5 mm (système métrique)
- 1/32" - 1/16" - 1/8" ou 3/16" (système anglo-saxon)

Le fil est le produit le plus utilisé, par sa polyvalence de projection (flamme ou arc électrique) et ses applications. Exemple : alliage Ni-Al, aciers inox (E55, E65), Mo...etc.

I.9.2 La baguette :

Elle est constituée de matériaux non tréfilable comme les céramiques et se présente sous forme d'une tige de longueur 24 pouces (610 mm) et dans les diamètres 1/8" - 3/16" et 1/4". Les compositions incluent plusieurs zirconias stabilisés, alumine blanche et grise et spinelle.

I.9.3 Le cordon souple :

Il permet l'utilisation de la plus part des matériaux non tréfilable. Il est constitué d'une gaine souple organique de faible épaisseur, qui vient enrober le matériau constitutif formant son âme. Cette gaine est totalement éliminée lors de la fusion.

Le conditionnement et les diamètres (1/8"- 3/16" ou 1/4") sont identiques à ceux du fil, ce qui permet de l'utiliser avec un pistolet classique à flamme ou à arc électrique.

Il apporte une solution avantageuse dans la projection et le mélange de produits très divers. (Céramiques, cermet, alliages auto-décapants et matériaux non tréfilables).

I.9.4 Le fil fourré :

Il existe plusieurs types de fils fourrés qui diffèrent par leur mode de fabrication. On trouve ainsi des fils fourrés étirés, plissés ou sertis. Leur fabrication consiste à garnir de poudre métallique, un feuillard métallique mis en forme par des galets, puis calibré à travers des filières pour obtenir le diamètre nominal. La fabrication peut être complétée par un ébavurage et un traitement de bleuissage au four. Le fil est ensuite conditionné en bobines. Il possède tous les avantages du cordon souple, mais il est exclusivement utilisé avec un procédé à arc électrique.

I.9.5 La poudre :

De constitution identique à l'âme d'un cordon, la poudre en garde tous les avantages au niveau des solutions apportées, avec une plus grande diversité de produits et de compositions.

Par contre, elle n'est projetable qu'avec un procédé adéquat.

La poudre est conditionnée en récipients translucides sur le distributeur d'alimentation du système de projection. [7]

CHAPITRE II : LES FONTES

II.1 Définition :

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4%. [8]

Composition moyenne :

- Carbone : 3 à 4%
- Silicium : 0.5 à 2.5%
- Manganèse : 0.4 à 1%
- Phosphore : 0 à 2%
- Soufre : $\leq 0.12\%$

II.2 Composition des fontes :

On distingue les différentes fontes par leur pourcentage de carbone :

-fonte hypoeutectique : de 2.11 à 4,3 % de carbone ;

-fonte eutectique : 4,3 % de carbone

Cette fonte a la température de fusion la plus basse à 1135 °C.

-fonte hypereutectique : de 4,3 à 6,67 % de carbone ;

Les aciers cristallisent dans le diagramme fer-carbone métastable: fer-cémentite, alors que les fontes cristallisent dans le diagramme fer-carbone stable : fer-graphite. (Figure II.1)

La différence entre ces 2 diagrammes réside en premier lieu dans la vitesse de refroidissement, qui quand elle est assez lente, permet d'obtenir du graphite, et non de la cémentite. [8]

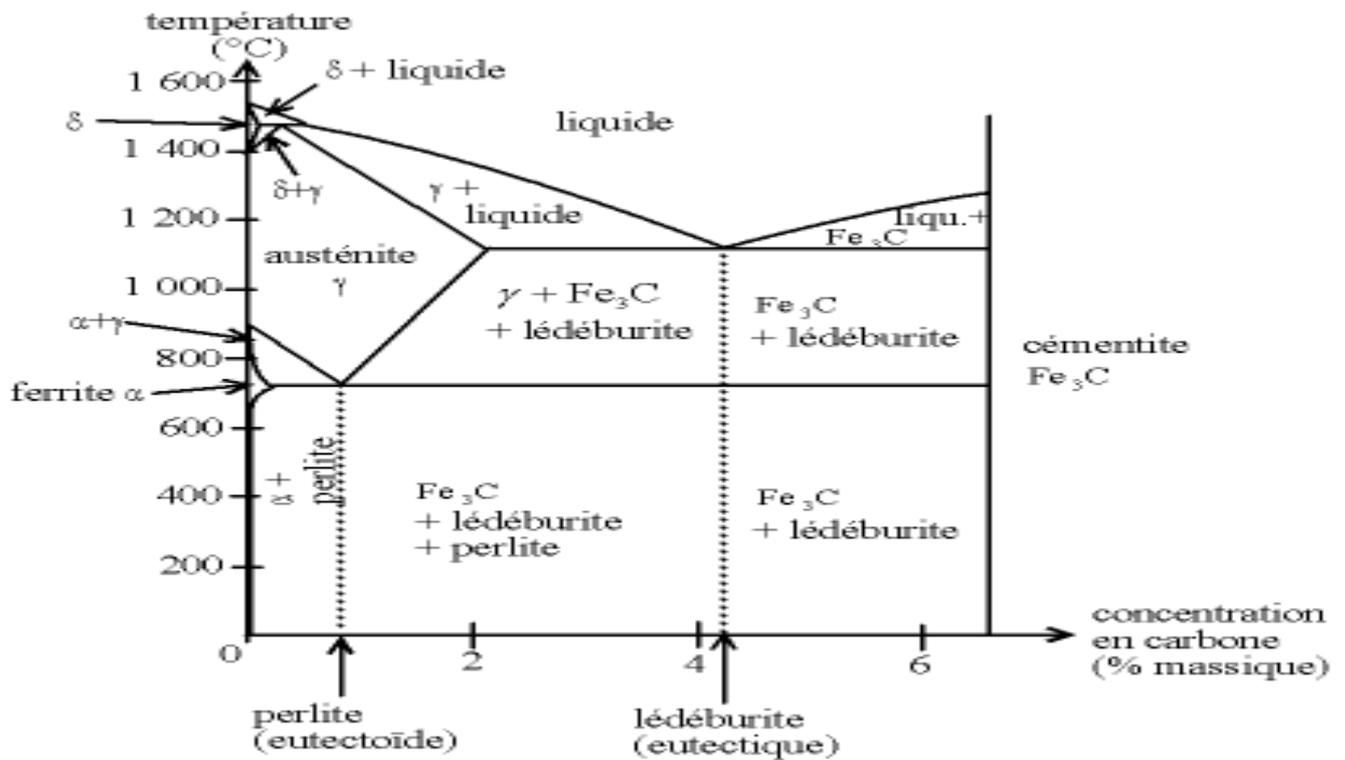


Figure II.1 Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser conditions d'existence des fontes [8]

Si le carbone eutectique est combiné sous forme de cémentite la fonte est **blanche** ; s'il est présent à l'état de graphite, elle est **grise** ; dans les cas intermédiaires la fonte est **truitee**. [8]

II.3 Modes d'obtention :

II.3.1 Fontes de première fusion :

C'est la fonte de base qui est obtenue directement par le traitement du minerai. Le déroulement des opérations est le suivant :

- Extraction du minerai
- Concassage, broyage
- Enrichissement pour éliminer le plus possible de gangue.
- Agglomération pour en faire des blocs.
- Réduction de ce minerai dans un haut fourneau pour obtenir de la fonte de première fusion, dont une partie sera affinée pour mouler des pièces en fonte. [9]

II.3.2 Fontes de composition chimique définie :

Ces fontes peuvent être élaborées dans plusieurs sortes d'appareils, les cubilots qui sont les plus utilisés, les fours électriques, fixes ou non, à arcs ou à induction.

II.3.3 Fontes de seconde fusion :

Elles sont obtenues par refusions des gueuses de premières fusion, affinage et dosage en fonction de la nuance voulue. Il faut remarquer que la plupart du temps on rajoute à ces gueuses des retours de fonderie.

II.3.4 Fontes synthétiques :

Elles sont obtenues par fusion d'une charge permettant de réaliser une synthèse chimique de tous les éléments simples qui constituent la fonte. Le fer est alors apporté par des riblons d'aciers non alliés, les éléments à introduire, par des ferro-alliages correspondants. Pour le carbone, on ajoute du ferromanganèse carburé, ou du graphite. [9]

II.4 Différents types de fontes :

Définitions :

Carbone total (Ct): quantité totale de carbone contenue dans la fonte, sous quelque forme qu'il soit. Ces quantités s'expriment presque toujours sous forme de pourcentage en poids.

Carbone graphitique (Cgr): pourcentage de carbone pur cristallisé dans le système hexagonal, on en parle seulement lorsque la totalité du carbone ne se présente pas sous cette forme dans la fonte. C'est un constituant très tendre et très friable n'ayant aucune cohésion.

- **Fonte eutectique** : se situe à 4.3% de C pour les fontes grises et à 4.25% de C pour les fontes blanches. Dans le cas d'une fonte alliée on se sert de l'indice de saturation du carbone Sc. [10]

$$Sc = \% Ct / D$$

$$D = 4.25 \text{ ou } 4.3 - (0.31 Si) - (0.25 P) + 0.07 (Mn - 2S) - (0.14 Cr) - (0.11 Ni) - (0.16 Al) - (0.4 Mo)$$

Si $Sc > 1$: Fonte hypo-eutectique

Si $Sc < 1$: Fonte hyper-eutectique

II.5 Structure des fontes :

On peut dire en première approximation que la structure d'une fonte est comparable à la structure d'un acier qui posséderait ou non du graphite et ayant une teneur en carbone variable.

Dans le cas d'une fonte blanche (sans graphite), la solidification et le refroidissement s'opèrent suivant le diagramme métastable : Fer-cémentite.

Dans le cas d'une fonte à graphite, mis à part celui-ci qui peut se présenter sous différentes formes, le pourcentage en carbone de la matrice dépendra de la vitesse de refroidissement. Plusieurs cas se présentent, si la vitesse de refroidissement est très lente, tout le refroidissement depuis l'état liquide s'opérera suivant le diagramme fer-graphite, et on aura une structure finale ferrite graphite. Si on augmente la vitesse de refroidissement, la solidification commencera suivant le diagramme fer-graphite et à un moment ou un autre se poursuivra selon le diagramme fer-cémentite. C'est le cas le plus complexe où l'on pourra trouver dans la matrice ferrite-perlite ou perlite seule. Il arrive également que dans ces deux matrices on note la présence d'une lédéburite soit pure soit enrichie de phosphore. Si la vitesse de refroidissement devient rapide, la solidification et le refroidissement suivront les lois du diagramme fer cémentite. Dans ce cas on aura de la ferrite et de la lédéburite. Plusieurs facteurs ont une influence sur la vitesse de refroidissement, facteurs liés au moule, à la grosseur de la pièce, à la température de la fonte au moment de la coulée, à la température de décochage. [10]

II.6 Action des principaux éléments présents dans la fonte :

Carbone : on le trouve sous forme de graphite et combiné au fer. On a remarqué que l'augmentation du carbone graphitique se fait plus rapidement que celle du carbone total. C'est pour cette raison que l'on peut dire que le carbone est un élément graphitisant.

Chrome : c'est un élément très durcissant et carburigène. Il affine la perlite, améliorant ainsi les caractéristiques mécaniques.

- avec 1% de chrome, apparition de carbures.
- avec 2% de chrome, la fonte devient blanche
- avec 12% de chrome les carbures s'affinent
- avec 30% de chrome la structure est une ferritique au chrome donnant une bonne résistance à la corrosion.

Cuivre : éléments soluble dans le fer jusqu'à 1.5%. C'est un graphitisant, 1% de cuivre équivaut à 0.3% de silicium. Il stabilise le graphite et affine la perlite.

Étain : cet élément est intéressant dans les pièces courantes de fonderie, lorsque l'on veut obtenir une matrice perlitique. Ainsi avec 0.1% de Sn seulement, on transforme une matrice ferrito-perlitique en une matrice perlitique.

Manganèse : il est maintenu à une teneur suffisante pour neutraliser le soufre en formant du sulfure de manganèse (MnS). Cette teneur minimale est fixée à :

$$\text{Mn} = 1.7 \% \text{S} + 0.3$$

Au dessus de cette proportion, il agit comme un faible stabilisant des carbures. En outre il affine la perlite et de ce fait élève la résistance à la traction. Sa teneur dans les fontes grises est généralement de 0.5 à 0.8%.

Molybdène : élément carburigène, il favorise la formation de structure aciculaire et affine celle-ci. Bonne action sur la résistance aux chocs. On l'associe souvent au nickel et au chrome en addition de 0.3 à 1%. On peut en trouver jusqu'à 10% dans les fontes blanches.

Nickel : soluble dans le fer, il n'est pas carburigène. C'est un élément graphitisant, trois fois moins énergétique que le silicium. Il affine la structure et plus on en ajoute, plus il modifie celle-ci qui passe de perlite en martensite, puis en austénite.

Phosphore : sa teneur varie en pratique de 0.05 à 1.5%. A partir d'une teneur de 0.1% environ, il forme un eutectique Fe-Fe₃C-Fe₃P fondant à 983°C. Cet eutectique phosphoreux ou steadite, crée des difficultés d'usinage et peut engendrer des porosités. Cependant le phosphore améliore beaucoup la fluidité et la coulabilité des fontes, tant que la composition n'est pas hypereutectique. Pour cette raison on emploie des fontes phosphoreuses de 0.7 à 1.2% de phosphore pour la fabrication des pièces à parois minces.

Silicium : c'est un graphitisant puissant, il déplace les points de transformation vers la gauche, ainsi pour 2% de silicium, l'eutectique se trouve à 3.7% au lieu de 4.3% de carbone, et l'eutectoïde à 0.6% de carbone au lieu de 0.8% de carbone. Il augmente également la température eutectique. Ces deux actions combinées font diminuer l'intervalle de solidification pour une teneur en carbone donnée, d'où une meilleure fluidité. On en trouve généralement de 1% à 3%.

Soufre : c'est un élément nuisible qui diminue la coulabilité. Il stabilise les carbures et rend la fonte dure, fragile et poreuse. On combat son effet par une addition de manganèse.

II.7 Fontes blanches :

Leur solidification se fait suivant le diagramme fer-cémentite. De ce fait, leur structure est formée d'un réseau important de carbures et d'une matrice perlitique. Leur cassure présente un aspect métallique blanc brillant. Ces fontes ont une bonne coulabilité, légèrement inférieures aux fontes grises.

Il ne faut pas confondre fonte blanche avec les fontes trempées, il ne s'agit pas là d'une fonte martensitique. Une fonte de composition comparable à celle d'une fonte grise, coulée contre un refroidisseur peut se transformer en fonte blanche sur une certaine épaisseur. Cela permet d'allier de bonnes caractéristiques de résistance à l'usure avec une meilleure capacité de résistance aux chocs. Dans la zone de transition entre la fonte blanche et la

fonte grise, existe une structure intermédiaire (fonte blanche dans laquelle sont insérées des lamelles de graphite) dite fonte trempée.

Par rapport aux aciers, les fontes blanches présentent une dureté élevée, d'où une grande résistance à l'usure par frottement et par abrasion, par contre cette dureté les rend fragiles et pratiquement inusinables par les moyens courants. Tableau II.1

	Fonte blanche	Fonte trempée
Ct %	2.8 à 3.6	3 à 3.6
Si %	0.5 à 1.3	0.5 à 1.6
Mn %	0.4 à 0.9	0.25 à 0.7
HB	300 à 575	350 à 575
Rm (N/mm)	140 à 350	140 à 350

Tableau II.1 caractéristiques chimiques et mécaniques d'une fonte blanche

Applications courantes :

- **Fontes blanches** : boulets de broyage, galets d'écrasement, pièces de pompes pour matériaux abrasifs, pièces mécaniques devant résister à l'abrasion, garniture de meules, etc.
- **Fontes trempées** : cylindres de laminaires, roues de wagons, galets de ponts roulants, etc. [10]

II.8 Fontes grises :

Dans ces fontes, la plupart du carbone se trouve sous forme de lamelles de graphite, formées par la solidification suivant le diagramme fer-graphite. Ce graphite donne aux fontes une cassure d'aspect gris, d'où leur nom.

II.8.1 Structure :

- **Graphite** : dans l'espace, les particules de graphite se présentent comme des feuilles au profil plus ou moins tourmenté. Au microscope, elles apparaissent alors sous forme de bâtonnets aux extrémités effilées. Leur longueur peut atteindre le millimètre.
- **Matrice** : comme dans les aciers, la matrice à l'état brut de coulée est composée de ferrite, perlite, ou d'un mélange des deux. On y trouve en plus des cristaux d'eutectique phosphoreux lorsque celui-ci dépasse 0.1% environ. Elle peut également contenir des carbures, lorsque la vitesse de refroidissement est importante ou lorsqu'elle contient des éléments carburigènes.
- **Ferrite** : elle est plus dure que celle des aciers en raison de sa teneur en silicium plus élevée. La tendance à sa formation croît avec la quantité de

carbone équivalent et celles des éléments graphitisants, mais elle diminue avec la vitesse de refroidissement (sauf s'il y a du graphite de type D).

- **Perlite** : sa dureté croît avec la finesse de ses lamelles, sa qualité et sa finesse dépendent de la composition chimique de la fonte et augmentent avec la vitesse de refroidissement.

II.8.2 Influence du graphite :

Si les lamelles de graphite n'ont que très peu d'influence sur la résistance à la compression, par contre il diminue considérablement la résistance à la traction de la matrice.

D'une part car il diminue la section efficace, d'autre part car les lamelles du fait de leur forme créent un effet d'entaille.

De ce fait lorsqu'un acier et une fonte présentent une dureté identique, la résistance à la traction de la fonte est beaucoup plus faible que celle de l'acier.

Exemple :

* XC 38 recuit HB = 180 Rm = 600 N/mm²

* Fonte grise HB = 200 Rm = 200 N/mm²

II.8.3 Influence de la structure de la matrice :

L'influence des différents constituants est identique à celle qu'ils auraient dans un acier, mis à part la dureté de la ferrite qui est plus importante que dans le cas d'un acier (effet durcissant du silicium).

II.8.4 Influence de l'épaisseur :

Les caractéristiques mécaniques dépendent beaucoup de l'épaisseur des pièces, car celle-ci fait varier la vitesse de refroidissement qui elle-même a une grande influence sur la grosseur et la répartition du graphite ainsi que lorsque l'épaisseur des pièces diminue, la résistance et la fragilité augmentent, d'où la composition chimique de la fonte devra être adaptée aux épaisseurs des pièces pour obtenir les caractéristiques mécaniques voulues.

II.9 Fontes malléables :

Il existe trois catégories de fontes malléables normalisées :

- fonte malléable à cœur blanc : NF A32-701
- fonte malléable à cœur noir : NF A32-702
- fonte malléable perlitique : NF A32-703

L'intérêt des fontes malléables est que tout en gardant de bonnes propriétés de coulabilité des fontes, ces matériaux ont des caractéristiques mécaniques se rapprochant de l'acier.

II.9.1 fabrication et structure :

Les pièces à obtenir sont d'abord moulées en fonte blanche. Tout le carbone est donc combiné sous forme de cémentite. Cette cémentite est ensuite transformée entièrement ou du moins en grande partie en graphite par traitement thermique. Suivant le type de fonte malléable à obtenir, différentes techniques de fabrication sont utilisées en partant de compositions légèrement différentes :

Pour les malléables à cœur blanc :

%C	%Si	% Mn	%S	%P
2.7 à 3.2	0.6 à 0.9	0.2 à 0.5	0.08 à 0.25	0.05 à 0.15

Pour les malléables à cœur noir :

%C	%Si	% Mn	%S	%P
2.7 à 2.8	1 à 1.7	0.3 à 0.65	0.06 à 0.2	0.08 à 0.15

II.9.2 fonte malléable à cœur blanc :

Elles sont aussi appelées fonte malléable européenne. Les pièces sont placées dans un four et entourées d'une atmosphère oxydante. Elles sont chauffées aux environs de 1000°C et maintenues à cette température. La superficie des pièces commence à se décarburer, puis le carbone présent à l'intérieur des pièces diffuse vers la surface où il est brûlé. Les durées du traitement peuvent atteindre 60 à 90 heures.

Dans les parties minces, la structure obtenue est entièrement ferritique et sans carbone. Dans les parties plus épaisses on peut trouver à cœur quelques nodules de graphite et de la perlite.

On traite de cette manière les pièces relativement minces le plus souvent inférieures à 10mm.

II.9.3 fontes malléables à cœur noir :

Elles sont aussi appelées fonte malléable américaine. Son traitement a évolué dans le temps et actuellement, on la traite le plus souvent de la façon suivante : chauffage vers 930°C, après un maintien, variable, refroidissement (qui peut être rapide) jusqu'à 730-740°C. Maintien, puis refroidissement final. On obtient donc par ce traitement une structure entièrement ferritique parsemée de nodules de graphite de forme IV répartis de façon uniforme.

On traite par cette méthode des pièces dont l'épaisseur va généralement jusqu'à 50 à 60 mm. [10]

Remarque :

Le temps de traitement dépend de l'épaisseur des pièces, mais on remarque qu'à épaisseur égale, le traitement est plus court pour une malléable à cœur noir que pour une malléable à cœur blanc.

II.9.4 Fonte malléable perlitique :

Cette nuance est obtenue à partir d'une malléable à cœur noir, selon deux méthodes différentes :

- Le début du traitement est identique à celui de la malléable à cœur noir, on le termine par un refroidissement rapide au passage de la température eutectoïde pour qu'il subsiste environ 0.8 à 1% de carbone combiné dans la matrice (ce qui formera une matrice

perlitique). On utilise à cet effet le refroidissement à l'air froid soufflé ou à l'huile. On pratique ensuite un revenu à haute température de façon à globuliser la perlite pour améliorer la ductilité et l'usinabilité. Cette méthode est assez délicate car il est difficile d'éviter la formation de ferrite.

- La seconde méthode consiste à effectuer un traitement de trempe et de revenu sur une fonte malléable à cœur noir. On réchauffe les pièces à 850 870°C et on trempe à l'huile généralement, le revenu effectué entre 550 et 720°C amènera la fonte à la dureté recherchée. On obtient ainsi une structure de martensite revenue.

II.10 Fontes à graphite sphéroïdal :

Ces fontes sont caractérisées par un graphite de solidification sphéroïdal, réparti de manière uniforme dans la matrice ferritique, ferrito-perlitique, perlitique (à l'état brut de coulée). Leurs différentes propriétés et caractéristiques mécaniques sont définies par la norme NF A32-201.

II.10.1 Elaboration :

La fonte de base destinée à la transformation en GS peut être élaborée dans l'un des quelconques fours généralement utilisés en fonderie. Elle peut avoir une composition chimique variable, mais une très faible teneur en soufre, généralement inférieure à 0.02%. Tableau II.2 et II.3

%C	%Si	% Mn	%S	%P
2.7 à 2.8	1 à 1.7	0.3 à 0.65	0.06 à 0.2	0.08 à 0.15

Tableau II.2 Composition chimique d'une fonte GS

%C	%Si	% Mn	%P	%S
3.2 à 4.0	1.8 à 2.8	0.18 à 0.8	<=0.06	<= 0.02

Tableau II.2 Composition chimique d'une fonte GS

Remarque :

Si on coulait cette fonte sans transformation, on aurait une fonte grise, pour obtenir de la fonte GS dans cette fonte de base, on introduit un alliage contenant deux sortes d'éléments, ayant des rôles opposés immédiatement avant coulée.

Des blanchissants qui ont pour rôle d'empêcher temporairement la formation du graphite en lamelles et à donner de la fonte blanche.

Des éléments graphitisants qui provoquent la formation de sphéroïdes de graphite.

Il est donc possible d'utiliser plusieurs types d'alliages mais les plus couramment utilisés sont des mélanges de Fe-Si-Mg qui sont des produits bon marché.

Si on utilise un alliage à 6% de Mg, il en faudra une quantité moyenne de 2.8% ce qui permettra d'obtenir des teneurs résiduelles de l'ordre de 0.05% de Mg.

Le point délicat de l'opération est le mode d'introduction de ces alliages dans la fonte liquide occasionnée par la présence du magnésium qui se transforme brusquement en vapeur. Un certain nombre de méthodes ont été étudiées et à l'heure actuelle, la méthode dite du "sandwich" semble très utilisée. La présence de ferrailles légères (ribbons) a pour but de retarder la réaction. On met environ 2% du poids de fonte traitée. Le volume de la poche doit être de 1/3 supérieur à celui du métal traité, la granulométrie de l'alliage au Mg a également une importance, on utilise en général des grains de 10 à 20 mm. [10]

II.10.2 Désignation normalisée :

La fonte à graphite sphéroïdal est désignée par le symbole FGS suivi de deux nombres.
 - le premier représentant la valeur minimale de la résistance à la traction en N/mm
 - le deuxième représente la valeur minimale de l'allongement pour cent.

II.10.3 Caractéristiques mécaniques :

Par référence à la norme, la qualité des fontes GS est définie par ses caractéristiques mécaniques déterminées sur des éprouvettes usinées à partir d'un bloc échantillon coulé à part. Les formes et dimensions de ces blocs sont parfaitement définies par la norme.

Le tableau ci-dessous résume ces caractéristiques :

Qualité	caractéristiques mécaniques minimales		Constituant prédominant de la structure	Dureté Brinell
	Rm N/mm	Re N/mm		
FGS 800-2	800	480	perlite ou structure de revenu	248-352
FGS 700-2	700	420	perlite	229-302
FGS 600-3	600	370	perlite	192-269
FGS 500-7	500	320	ferrite-perlite	170-241
FGS 400-12	400	250	ferrite	<=201
FGS 370-17	370	230	ferrite	<=179

Remarque : 1 N/mm² = 1 MPa = 0.102 Kgf/mm

L'allongement est mesuré sur une longueur initiale entre repères $l_0=5 \times d$

II.11 Fontes alliées ou spéciales :

Lorsque l'on a besoin d'une fonte possédant des propriétés particulières, on peut faire appel à ce type de fonte, dont les éléments d'addition peuvent faire varier les propriétés physiques, chimiques ou mécaniques. Les utilisations que l'on rencontre le plus souvent dans l'industrie, font appel aux qualités suivantes :

II.11.1 Fontes blanches :

Les fontes ni-hard : sont des fontes à structure martensitique, dont la caractéristique principale est la résistance à l'usure, et ce jusqu'à 700°C.

Les fontes à carbures de chrome : en plus de leur résistance à l'usure, présentent une bonne résistance à l'oxydation jusqu'à 900°C.

Les fontes ferritiques au chrome : elles se caractérisent par une conservation des caractéristiques jusqu'à 600°C, une excellente résistance au gonflement et à l'oxydation, jusqu'à 1000°C et une bonne résistance à la corrosion par de nombreux acides.

II.11.2 Fontes grises et GS :

Les qualités suivantes intéressent aussi bien les fontes grises que les fontes GS, à l'exception des fontes à 14-18% de silicium dont le graphite est lamellaire.

Les fontes perlitiques améliorées : elles permettent par une addition modérée en éléments une amélioration des caractéristiques mécaniques ou de la résistance à l'usure, aux frottements, une amélioration de la résistance aux températures inférieures à 550°C ou une augmentation de la résistance à la corrosion par des milieux moyennement agressifs.

Les fontes bainitiques ou martensitiques : elles sont obtenues à l'état brut de coulée, ces structures présentent une excellente résistance à l'usure par frottement même sous des pressions élevées, allée à des caractéristiques mécaniques élevées et une bonne capacité d'amortissement des vibrations.

Les fontes ferritiques à 5-7% de Si : elles forment une couche de silice en surface qui empêche le développement de l'oxydation et le gonflement des particules de graphite. Les températures d'utilisation atteignent 850°C (Graphite lamellaire) ou 900°C (graphite sphéroïdal).

Les fontes ferritiques à 14-18% de Si : à graphite lamellaire, excellente résistance à la corrosion par la plupart des acides organiques et minéraux à toute concentration et par les sels très agressifs.

Les fontes austénitiques : elles forment un groupe important défini dans la norme NF A32-301. [10]

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1 Introduction :

Ces travaux présentent un traitement de surface de pièces en fonte grise par métallisation à partir des éprouvettes métallisées à l'aide d'un acier inoxydable résistant à l'usure de nuance Z2CN18-10.

Comparée à la métallisation courante, cette méthode assure une meilleure structure et une meilleure adhésion.

Dépendant des paramètres du procès, divers types de surfaces de pièces en fonte traitée peuvent être obtenus. Les tests montrent la qualité d'adhérence de cet acier inoxydable sur le métal de base en utilisant une couche intermédiaire entre ces deux derniers composée d'un alliage de nickel-aluminium.

III.2 Composition chimique et structure :

Nous avons utilisé dans notre étude **la fonte grise GSC**, qui ont été prélevés à partir des éprouvettes cylindriques d'environ 140 mm de longueur et 10 mm de diamètre, et aussi des éprouvettes circulaires de diamètre 50 mm et d'épaisseur de 8 mm.

Avant d'entamer notre étude, nous avons déterminé la composition chimique de notre métal de base (**fonte grise GSC**), de notre couche intermédiaire (**alliage de Nickel-Aluminium**), et enfin de la couche métallisée d'acier inoxydable.

L'analyse a été réalisée par spectroscopie de fluorescence X. Les compositions chimiques de la fonte GSC et de l'acier inoxydable sont données respectivement dans les tableaux III.1 et III.2.

Nuance	% Carbone	% Silicium	% Manganèse	% Soufre	% Phosphore	% Magnésium	% Cuivre	%C équivalent	% Autres éléments chimiques
GSC	3,50 4,00	2,50 3,00	≤ 0,30	≤ 0,02	≤ 0,06	≤ 0,06	≤ 0,20	4,30 4,95	traces

Tableau III.1 Composition chimique de la fonte grise GSC

Nuance	% Fer	% Carbone	% Chrome	% Nickel	% Manganèse	% Silicium
Z2CN18-10	68,04	0,025	18,88	10	1,8	0,85

Tableau III.2 Composition chimique de l'acier inoxydable Z2CN18-10

Par contre, la sous couche d'accrochage (couche intermédiaire) est un alliage composé essentiellement de **80% de Nickel** et **20% d'Aluminium**.

On a effectué une métallisation avec et sans couche d'accrochage sur deux structures différentes.

- L'une est de type de matrice ferritique sur la fonte GSC sous forme de barre coulée dans un moule en conning réduisant la cinétique de refroidissement. Le démoulage étant effectué jusqu'à ce que la température ambiante soit atteinte.

- L'autre est de type truité sur la fonte GSC sous forme de médaille coulée dans un moule métallique et refroidie à l'eau, celle-ci est destinée pour l'analyse chimique par spectrométrie.

III.3 L'opération de la Métallisation :

L'opération de la métallisation a été réalisée par le procédé à arc électrique. Figure I.6 La métallisation a été effectuée en deux étapes différentes :

Le métal de base, le premier dépôt de Ni-Al et le deuxième dépôt d'acier inoxydable sont représentés comme suit. Figure III.1

Une deuxième métallisation à titre comparatif a été effectuée, qui consiste à projeter l'acier inoxydable sur le substrat sans couche intermédiaire. Figure III.2

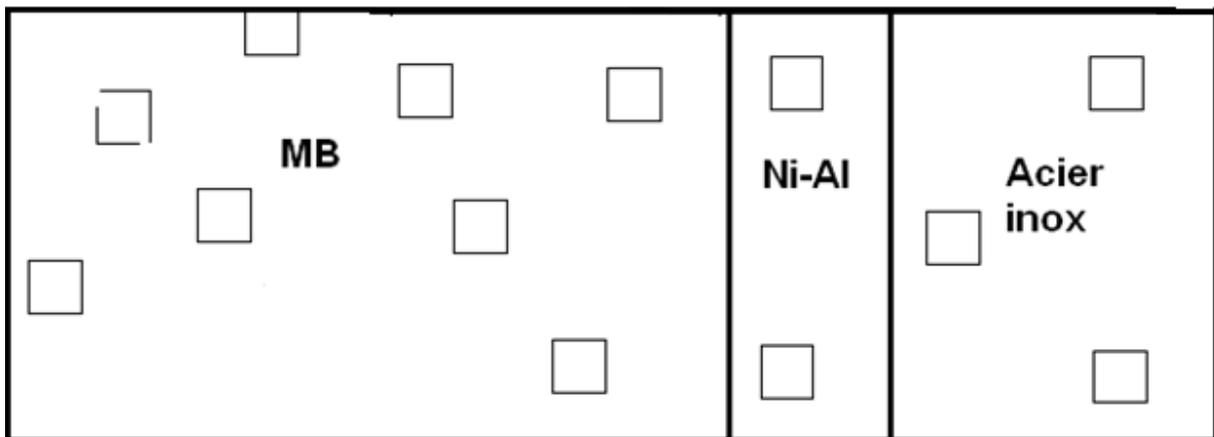


Figure III.1 Schéma qui représente les couches existantes dans la première métallisation

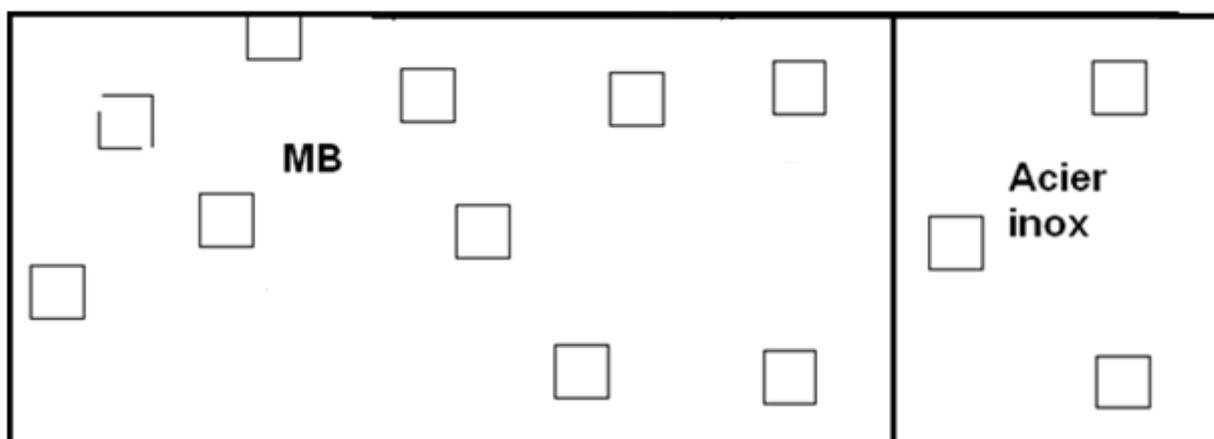


Figure III.2 Schéma qui représente les couches existantes dans la seconde métallisation

Le métal projeté en acier inox est fabriqué sous forme de fil nu de diamètre égal à 3,17 mm.

La couche intermédiaire de nickel-aluminium est aussi fabriquée sous forme de fil nu de diamètre égal à 2,5 mm.

Les deux fils de métallisation de même nuance sont polarisés électriquement, fusionnés et projetés à l'air comprimé. Figure I.6 et Figure III.3.

Les paramètres utilisés lors de métallisation sont au tableau III.3



Figure III.3 Pistolet de projection à arc électrique « Arc spray 234 » ayant servi à la projection de l'acier inoxydable 55^E et du Ni-Al

Pression de la projection	3 bars
Tension du générateur	30 V
Intensité de courant	100 A
Distance de projection	150 mm
Angle de tir	90°
Diamètre des fils	2,5-3,17mm

Tableau III.3 Conditions de projection thermique

➤ **Préparation de la fiche technique de la métallisation :**

Avant l'opération de projection, la pièce à projeter doit être préparée soigneusement. Pour cela,

Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir:

- une propreté et une rugosité.
Cet état de surface est obtenu par grenailage
- un préchauffage éventuel.

Après le nettoyage de la surface du métal de base, on a réalisé la projection par le procédé à arc électrique dans un atelier situé a HAMMADI appelé ALGERIE METALLISATION comme le montre la figure III.4 ci-dessous :



Figure III.4 Arc électrique en cours de fonctionnement

Le système de projection par arc électrique comprend un pistolet ayant un ensemble d'alimentation en puissance électrique et en fils. L'arc électrique est réalisé à la sortie de la buse par le contact des deux fils de même nuance. Le dispositif expérimental est schématisé dans la figure I.6.

Une couche de fil fondu est déposée plusieurs fois par le passage du pistolet sur la surface du substrat.

La projection est réalisée :

- Avec couche d'accrochage.
- Sans couche d'accrochage.

III.4 Caractérisation :

Elle est composée en deux parties, l'une microstructurale où l'on met en évidence les différentes phases et couches qui apparaissent qualitativement et quantitativement.

L'autre est mécanique où on va entamer des différents essais : essai de traction, essai de pliage et de micro-dureté.

III.4.1 Caractérisation microstructurale :

Les échantillons destinés à la caractérisation microstructurale ont été découpés à l'aide d'une tronçonneuse à partir des éprouvettes circulaires et cylindriques traitées.

III.4.1.1 Préparation des échantillons :

Après prélèvement des échantillons, on a effectué un enrobage à chaud à une température de 180 °C afin de permettre une manipulation plus aisée des échantillons et d'assurer la planéité de la surface lors du polissage.

Le polissage a pour buts principaux l'obtention d'une surface plane et qualité de surface miroir. Cette opération de polissage est effectuée en deux étapes :

- La première consiste en un polissage grossier de la surface à l'aide de papiers recouverts de poudre abrasive de granulométrie décroissante (400, 800, 1000, 1200 et 4000) en utilisant l'eau comme lubrifiant, L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible granulométrie.
- La seconde est effectuée par une polisseuse de finition sur un papier feutre avec une solution d'alumine pour la lubrification.

Avant l'attaque chimique, nous avons vérifié au microscope optique que les échantillons ne possèdent aucune rayures pour pouvoir finalement accéder à l'attaque chimique.

III.4.1.2 Attaque chimique :

Une fois la préparation des échantillons achevée, nous avons procédé à leur attaque pour la mise en évidence de l'état structural de la matrice. Nous avons réalisé, sur nos échantillons, une seule attaque chimique.

L'attaque chimique provoque une dissolution différentielle des phases suivant leur nature et leur composition. Le réactif que nous avons utilisé dans notre étude est le **NITAL à 4% de HNO₃**, il permet la révélation des joints de grains ferritiques et perlitiques, la ledéburite, les interfaces de métallisation.

III.4.1.3 Observation microscopique :

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

III.4.1.3.1 Microscopie Optique :

L'observation des microstructures a été réalisée au Centre de recherche et de développement qui se situe à BOUMERDES à l'aide d'un microscope optique OLYMPUS avec plusieurs grossissements (12,5, 50,100, 200, 500, 1000) muni d'une caméra numérique avec logiciel (ANALYSIS 3.2), ce qui facilite la sauvegarde et le traitement des micrographies obtenues.

➤ **DISPOSITION MECANIQUE :**

Le microscope utilisé est du type *inversé* (microscope dit métallographique) avec lequel l'objet est observé par-dessous ne nécessite qu'une seule face plane (figure III.5). La disposition des différents éléments peut être verticale ou horizontale (banc métallographique).

Le support de l'optique ou de l'échantillon est habituellement en porte-à-faux, pour diminuer les flexions parasites qui troublent la mise au point.

La plupart des microscopes sont équipés d'une chambre photographique de grand et de petit format, avec une exposition automatique réglée sur tout ou partie de l'image. Le centrage des faisceaux lumineux, le réglage du diaphragme de champ et du diaphragme d'ouverture sont maintenant très simples et très stables.

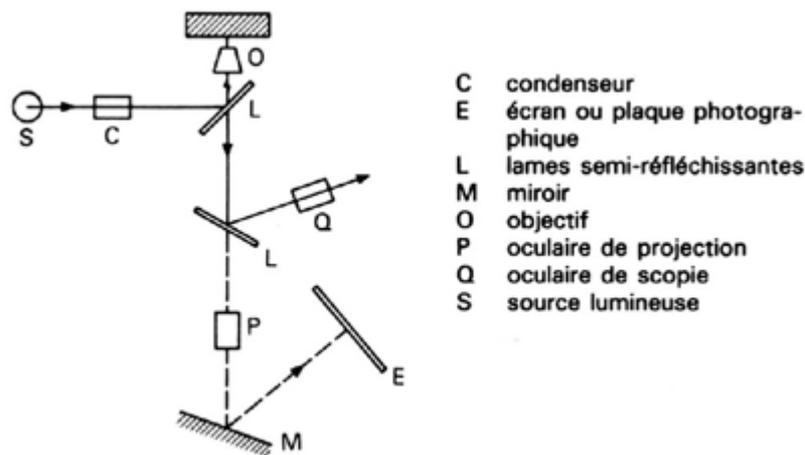


Figure III.5 Microscope optique métallographique (dit inversé). [11]

Pour un même échantillon, on a pu prendre plusieurs photos sur différentes pages. Le but est d'observer les différentes couches après la métallisation, ainsi que la microstructure de la fonte grise utilisée.

III.4.1.3.2 Microscopie Electronique à Balayage :

Pour affiner l'investigation des microstructures et confirmer les résultats obtenus par microscopie optique, on a été appelé à utiliser la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) investigation réalisée au CDTA, le microscope électronique utilisé est de type JEOL JSM- 6360 LV en utilisant le signal produit par l'émission d'électrons secondaires qui sont sensibles au micro relief de la surface optique (Figure IV.8). Il est couplé à un système de microanalyse (EDX) et de diffraction de rayons X. les échantillons doivent présenter une conductibilité superficielle de l'électricité pour écouler les charges, c'est pourquoi l'enrobage des échantillons est enlevé [11].

III.4.1.3.3 Analyse ponctuelle par EDX :

Pour identifier les différentes phases existantes, nous avons utilisé l'analyse ponctuelle par EDX (pour Energy Dispersive X-ray fluorescence). Elle permet d'analyser le spectre d'un

rayonnement de rayons X en regardant l'énergie d'un photon détecté. On dispose pour cela d'un détecteur semi conducteur, en général du Silicium dopé au Lithium (Si(Li)).

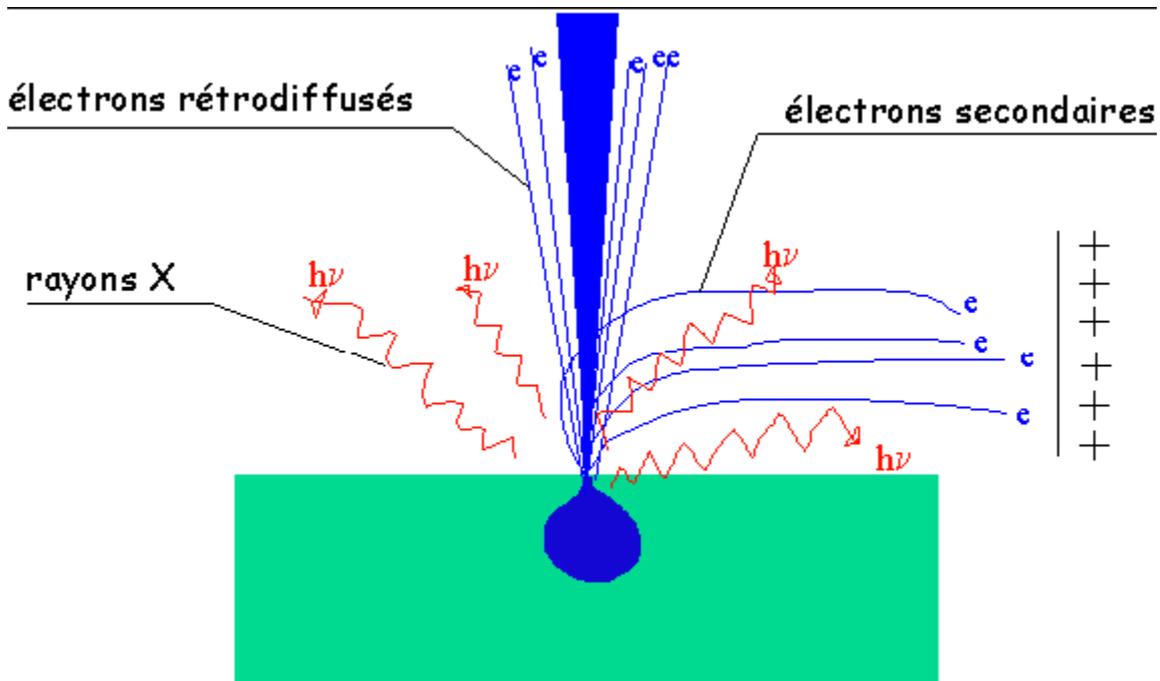


Figure III.6 : Interaction électron/matière: les différents signaux produits [11].

Ce détecteur est soumis à une tension de prépolarisation. Lorsqu'un photon X pénètre dans le détecteur, il engendre des défauts (paires électron/trou) qui permettent le passage d'un courant électrique. Ce courant est une impulsion électrique. Plus un photon a de l'énergie, plus il crée des défauts dans le Si(Li), donc plus l'impulsion générée sera forte. La hauteur de l'impulsion est proportionnelle à l'énergie du photon, on peut ainsi immédiatement savoir de quel photon il s'agit. Après, il suffit de compter le nombre d'impulsions d'une hauteur donnée pour savoir le nombre de photons d'une énergie que le détecteur a reçu. Il est alors possible de stopper le balayage et donc d'analyser en un point de l'image de son choix. Le détecteur détermine l'énergie des photons qu'il reçoit, on tracera ensuite un histogramme avec en abscisse les énergies des photons et en ordonnée le nombre de photons reçus. L'interprétation des spectres est facilitée par une base de données qui contient pour chaque élément les énergies et les intensités des raies qu'il produit. Il est possible de faire apparaître pour chaque énergie du spectre la liste des éléments qui possèdent une raie dans ce domaine énergétique. [11]

III.4.2 Caractérisation mécanique :

III.4.2.1 Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de cette éprouvette d'essai. Cet essai est réalisé à l'aide d'une

machine qui enregistre les efforts. Elle permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile.

Dans notre expérience, on a utilisé des éprouvettes qui ont une forme de barreau de diamètre D_0 et de longueur L_0 . Figure III.7

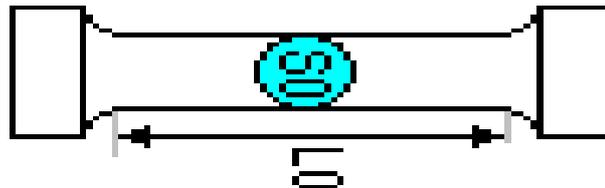


Figure III.7 Eprouvette de traction

Le diagramme de traction conventionnel est représenté sur la figure III.8 :

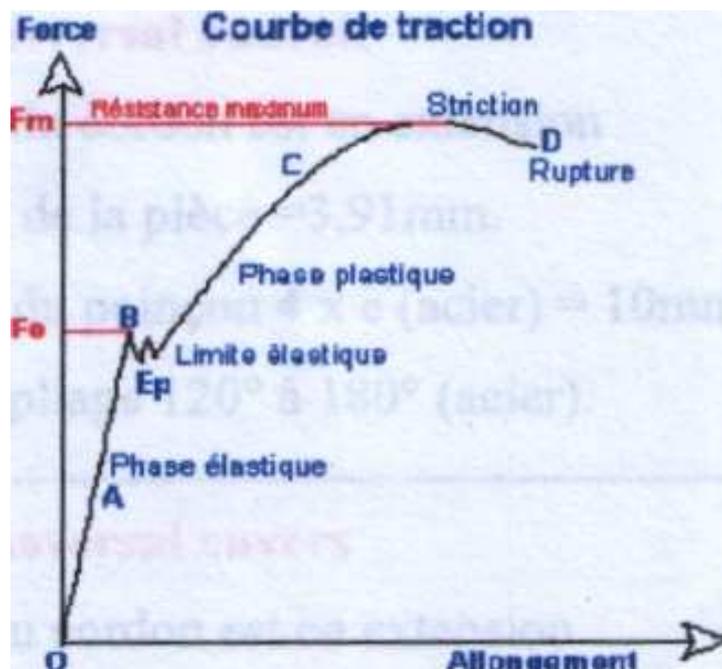


Figure III.8 : Courbe conventionnelle de traction

Les différents domaines de la courbe de traction sont :

- OB qui est la phase élastique.
- BC qui est la phase plastique.
- Entre F_m et D qui la phase de striction.

- D qui est la rupture.

Les déformations de l'éprouvette sont permanentes et irréversibles.

Les caractéristiques mécaniques de la traction sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques de traction	Formules de calculs
Limite élastique apparente Re	$Re \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fe \text{ (MPa ou N) / } So \text{ (mm)}$.
Résistance à la rupture Rm	$Rm \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fm \text{ (MPa ou N) / } So \text{ (mm)}$.
Allongement en % : A %	$A \text{ ((} Lu - Lo \text{) / } Lo \text{) } \times 100$.
Striction en % : Z %	$Z \text{ ((} So - Su \text{) / } So \text{) } \times 100$.

Il existe une autre représentation de la courbe de traction de plus en plus utilisée au laboratoire qui consiste de reporter la contrainte vraie (δ) en fonction de la déformation rationnelle de traction (ϵ).

L'allure de telle courbe est représentée sur la figure III.9 :

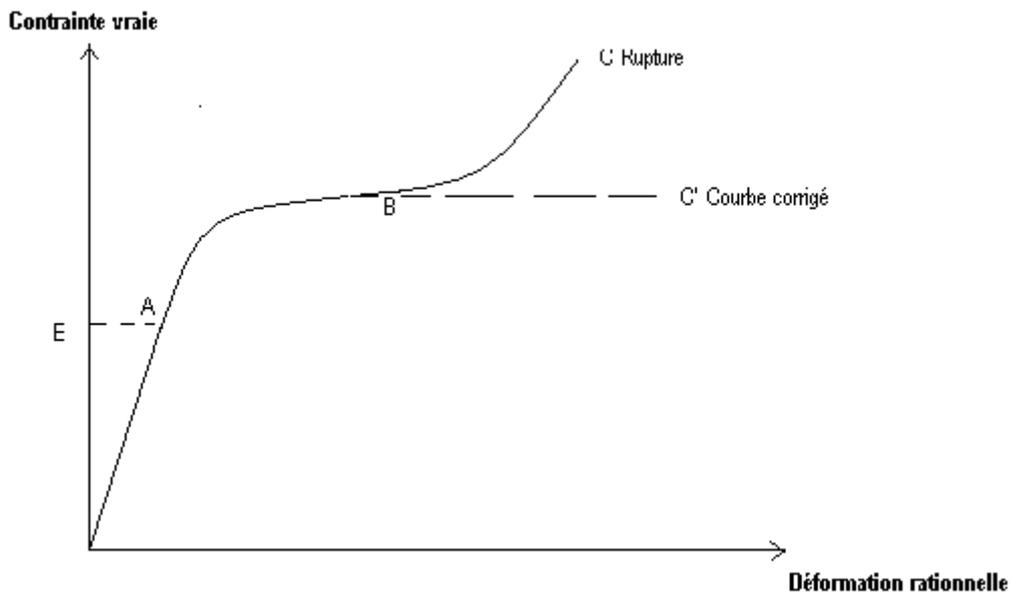


Figure III.9 : Courbe rationnelle de traction.

Avec :

- $\delta_{Vraie} = F (A+1)$
- $\varepsilon = \ln (A+1)$

F : la force de traction.

A : l'allongement.

III.4.2.2 Essai de pliage :

L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage.

Ce pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle alpha déterminé avec le prolongement de l'autre branche. Figure III.10

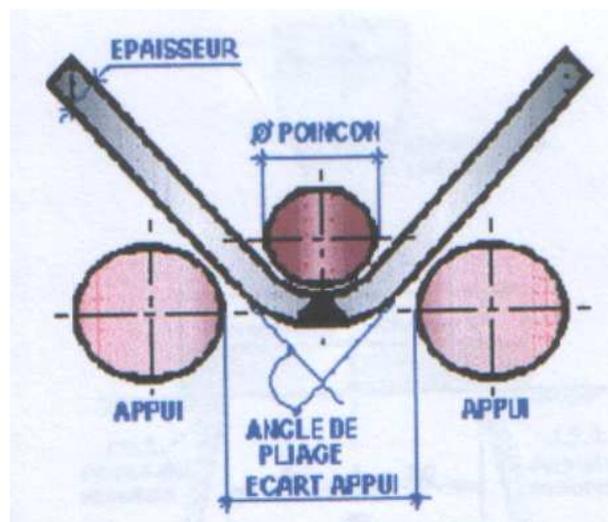


Figure III.10 Principe de l'essai de pliage

III.4.2.3 Essai de micro-dureté :

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou, en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration

Dans le cas de la micro-dureté Vickers, le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et d'angle de 36° au sommet. Figure III.11

Notre essai a été réalisé sur des échantillons polis de substrat à matrice différentes (ferritique et trempé)

Lors des essais de micro-dureté, les charges utilisées sont : 100gr et 200gr. Le temps de pénétration de 15 secondes étant constant durant tous les essais.

Les mesures de filiation de la micro-dureté dans notre cas sont été effectuées par un balayage, ce qui a pour objectif d'étudier l'évolution de la micro-dureté dans les différentes zones des échantillons utilisés (métal de base, couche d'accrochage, couche inox et leurs interfaces).

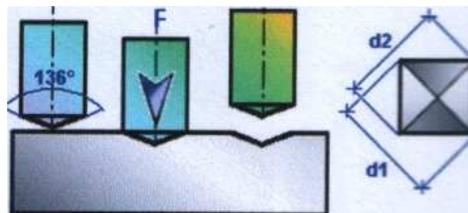


Figure III.11 Principe de l'essai de micro-dureté

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

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

Une étude comparative a été faite qui consiste à utiliser 6 échantillons différents :

- Deux échantillons cylindriques projetés en acier inoxydable en utilisant une couche intermédiaire du Ni-Al.
- Deux échantillons cylindriques projetés en acier inoxydable sans utiliser la couche intermédiaire du Ni-Al.
- Un échantillon sous forme d'une médaille projeté en acier inoxydable en utilisant une couche intermédiaire du Ni-Al.
- Un échantillon sous forme d'une médaille projeté en acier inoxydable sans utiliser la couche intermédiaire du Ni-Al.

Une synthèse sera également formulée.

IV.1 Analyse quantitative et qualitative :

ECH 1 : Barreau (substrat---couche d'acier inoxydable)

L'échantillon 1 est un barreau qui est métallisé en acier inoxydable uniquement. On remarque sur la microstructure de la figure IV.1 qu'on a une fonte grise à graphite nodulaire à matrice ferritique dont les compositions volumiques des phases existantes sont données dans le tableau IV.1 ci-dessous :

Phases	Ferrite	Perlite	Graphite
Composition %	83	8,8	8,2

Tableau IV.1 : Pourcentage volumique des phases et du constituant perlitique dans l'échantillon 1 (matrice)

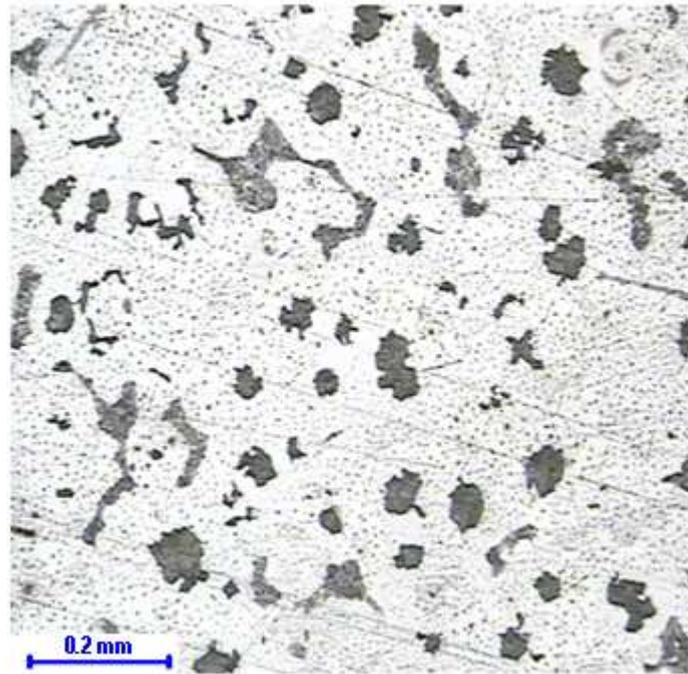


Figure IV.1 : micrographie de l'échantillon 1 (substrat)

La figure IV.2 ((a) et (b)) montre que la couche métallisée n'adhère pas bien sur notre métal de base, on constate la présence des fissures à l'interface entre le métal de base et l'acier inoxydable projeté.

Aussi, l'acier inoxydable a une structure lamellaire typique des dépôts projetés thermiquement. Elle est plus ou moins hétérogène. Les particules et les zones sombres, représentent des oxydes (Cr_2O_3), des inclusions et des porosités.

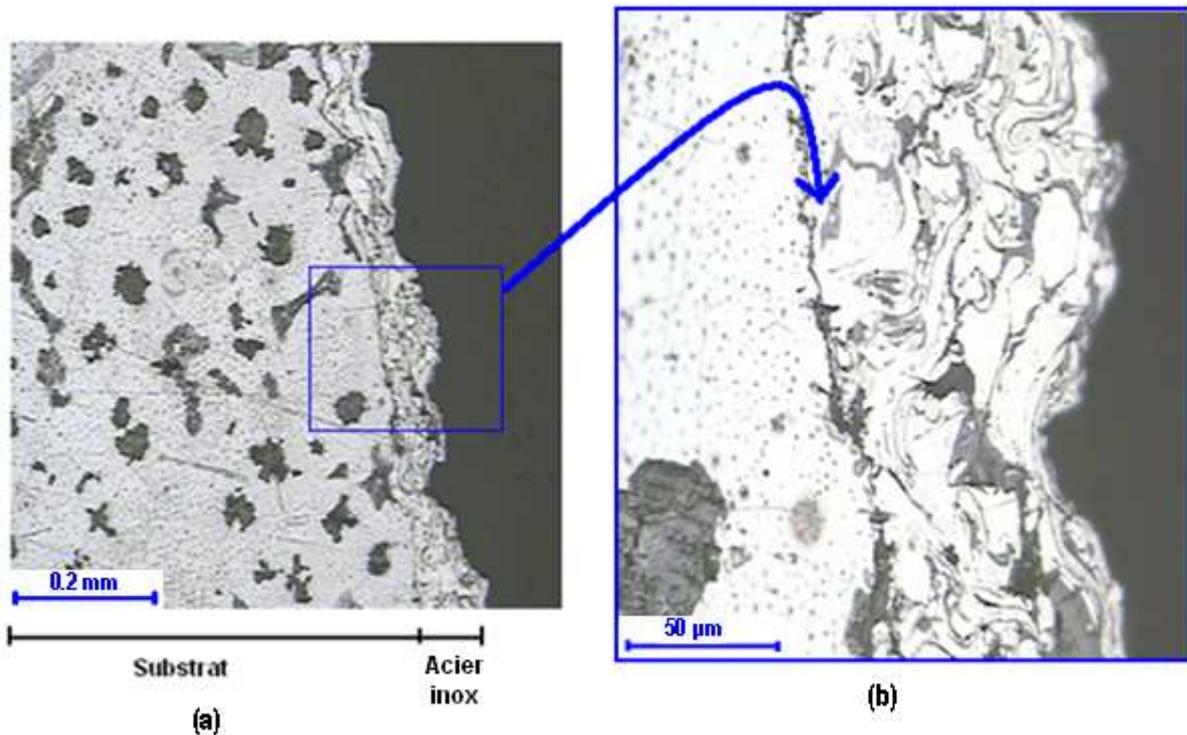


Figure IV.2 ((a) et (b)) : Micrographie de l'échantillon 1 (interface)

La figure IV.2 (c) a été prise au MEB illustrant également la mauvaise adhérence entre le substrat à matrice ferrito-perlitique et l'inox.

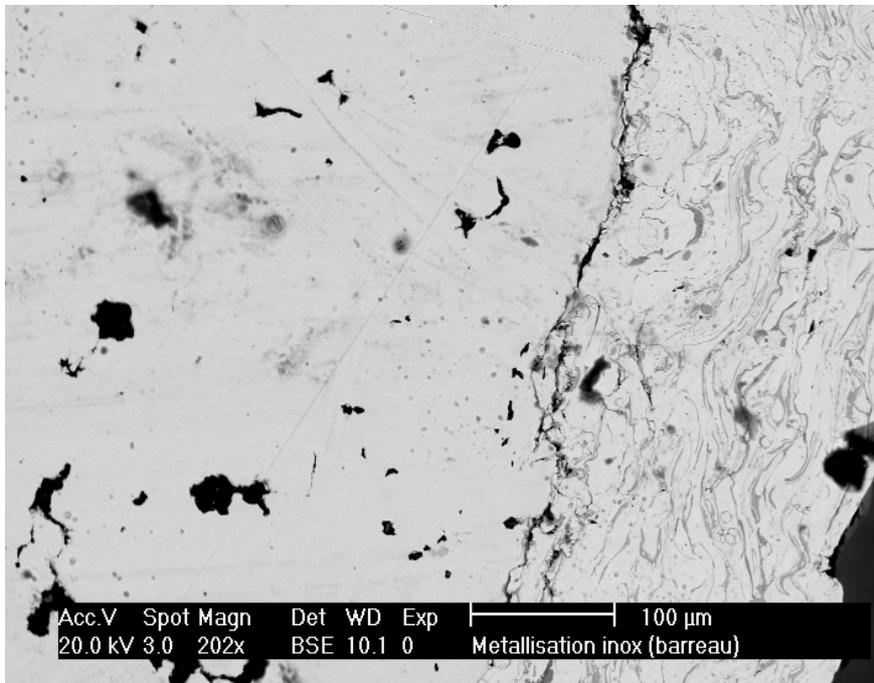


Figure IV.2 (c) : Micrographie de l'échantillon 1 prise au MEB

➤ Analyse par l'EDX :

On constate selon la figure IV.2 (d) représentant un profil de concentration de l'ensemble des éléments C, Si, Cr, Ni et Fe que la diffusion est pratiquement inexistante du fait qu'on observe une chute du profil de Cr sur une courte distance.

Le chrome est le seul élément important par sa concentration qui nous permet de conclure la non diffusion inox---substrat.

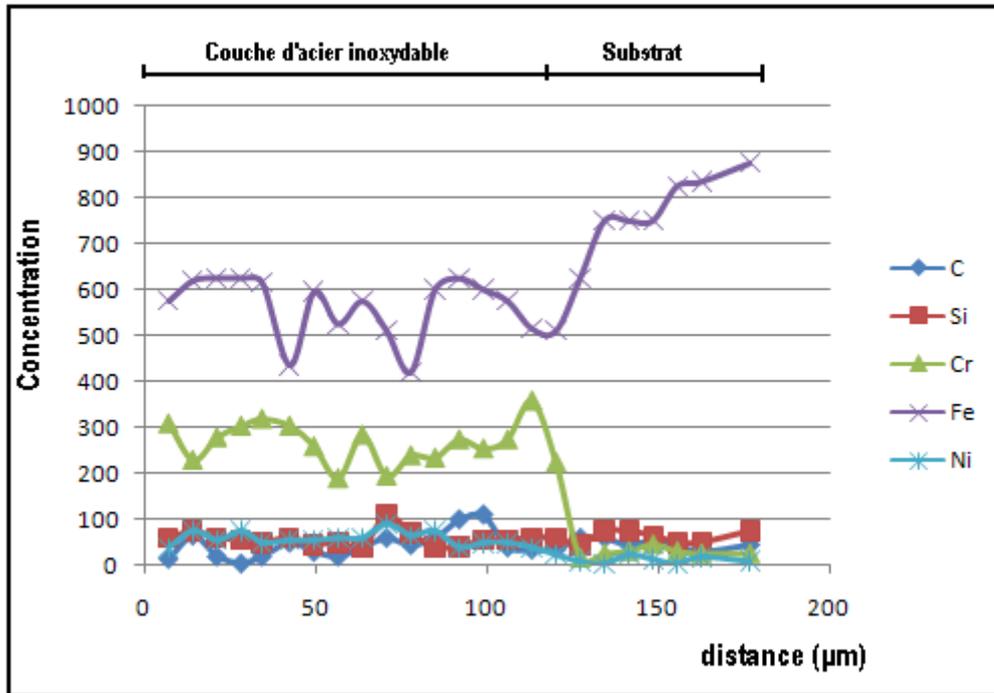


Figure IV.2 (d) : Evaluation des éléments sur le barreau (substrat---couche d'inox)

ECH 2 : Barreau (substrat---couche de Ni-Al---couche d'acier inoxydable).

L'analyse quantitative du tableau IV.2 montre qu'on a une fonte grise à graphite lamellaire à matrice ferritique. (Figure IV.3).



Figure IV.3 Micrographie de l'échantillon 2 (substrat)

Phases	Ferrite	Perlite	Graphite
Composition (%)	78	10,5	11,5

Tableau IV.2 : Pourcentage volumique des phases existantes et du constituant perlitique dans l'échantillon 2 (matrice)

La vue de l'interface des deux dépôts est décrite dans la figure IV.4, le premier est en Ni-Al et l'autre en acier inoxydable, ils sont bien accrochés entre eux et sur le substrat.

L'utilisation de la couche du Ni-Al a pour but d'améliorer l'adhérence de cet acier inoxydable dont son effet mécanique de plasticité joue un rôle très important pour avoir une bonne adhérence.

Le grossissement de la microstructure aide à observer qu'il n'existe aucune fissure sur les interfaces, que se soit l'interface (substrat---Ni-Al) ou l'autre interface (Ni-Al---acier inoxydable).

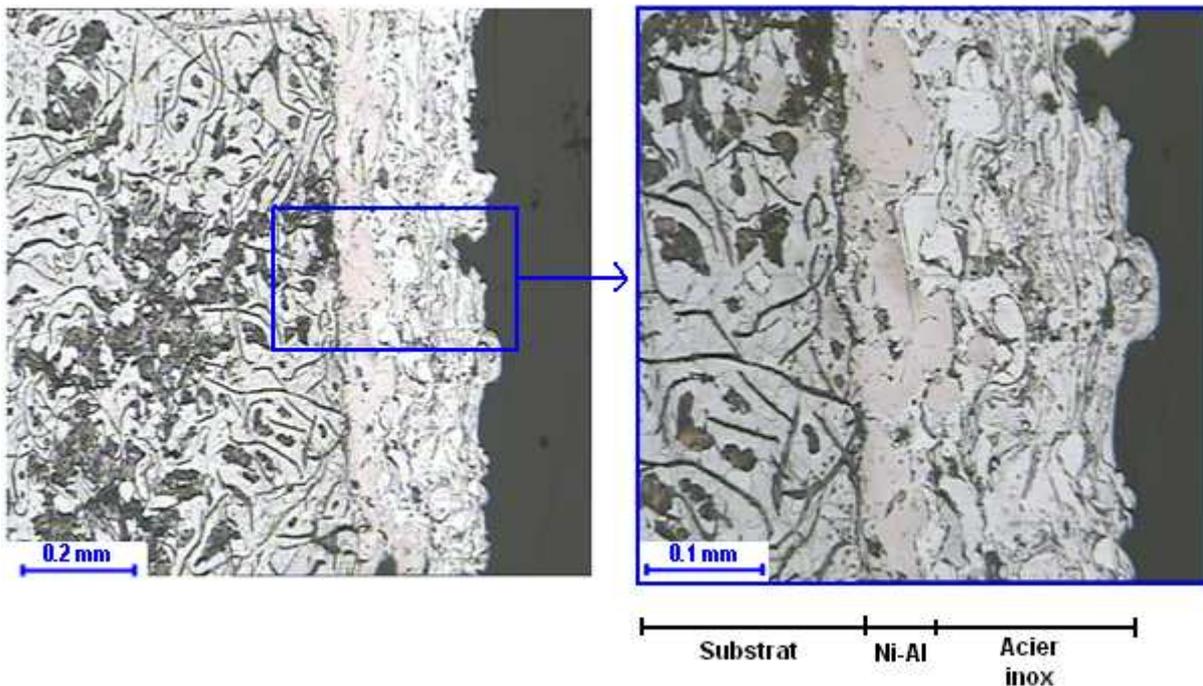


Figure IV.4 : Micrographie de l'échantillon 2 (Interfaces)

ECH 3 : Médaille (substrat---acier inoxydable)

On constate de la figure (IV.5) qu'on a une fonte grise à graphite sphéroïdal à matrice lédeburitique dont les pourcentages volumiques des phases et des constituants existants sont représentés dans le tableau (IV.3).

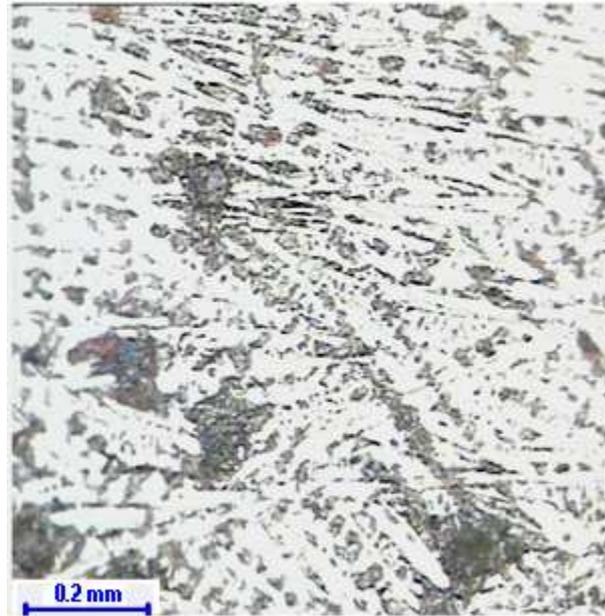


Figure IV.5 : Micrographie de l'échantillon 3 (substrat)

Phases	graphite	Lédeburite+ quelques ilots de perlite
Composition %	11,75	88,25

Tableau IV.3 : Pourcentages volumiques des phases et des constituants existants dans l'échantillon 3 (matrice)

La figure IV.6 montre que la couche d'acier inoxydable projeté sur le substrat n'adhère pas. Le grossissement élevé nous aide à observer l'interface entre le substrat et le dépôt d'acier inoxydable, ce dépôt ne s'accroche presque pas sur la médaille sur toute la surface projetée. On peut dire que cet acier inoxydable a de grandes difficultés d'adhérence en observant les fissures qui existent à l'interface et le déchaussement du dépôt.

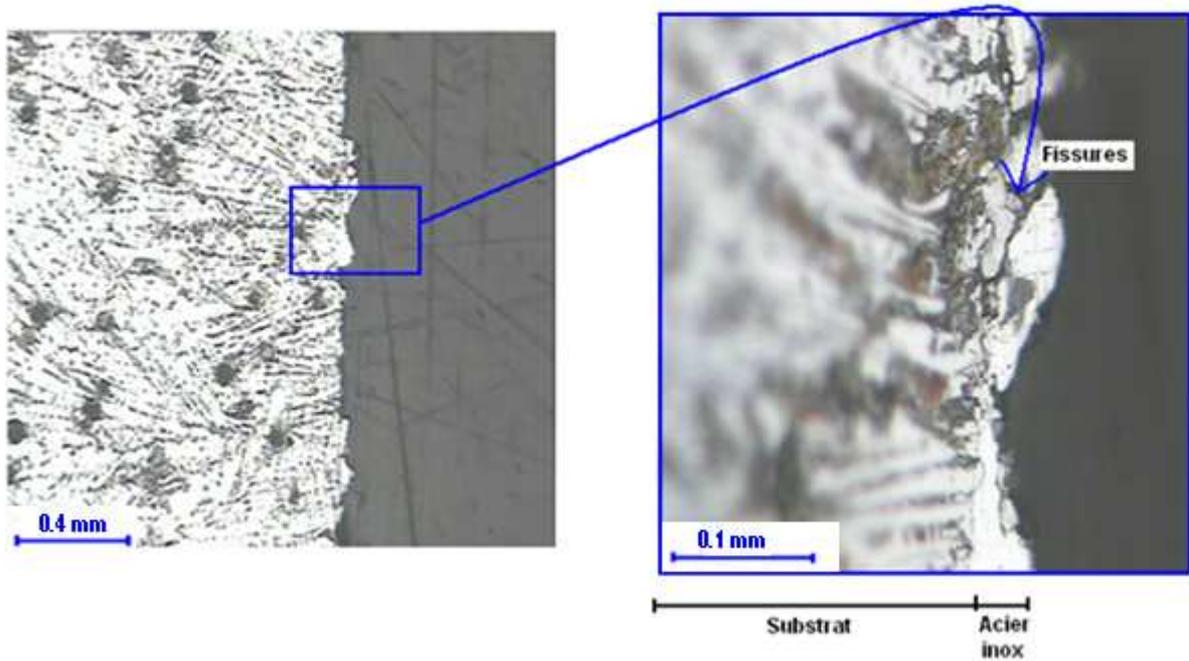


Figure IV.6 : Micrographie de l'échantillon 3 (interface)

ECH 4 : Médaille (substrat---couche de Ni-Al---couche d'acier inoxydable)

Une analyse quantitative a été faite également sur la fonte grise à graphite sphéroïdal à matrice lédeburitique (figure IV.7) et qui nous a donné les pourcentages volumiques des phases et des constituants existants présentés dans le tableau IV.4.

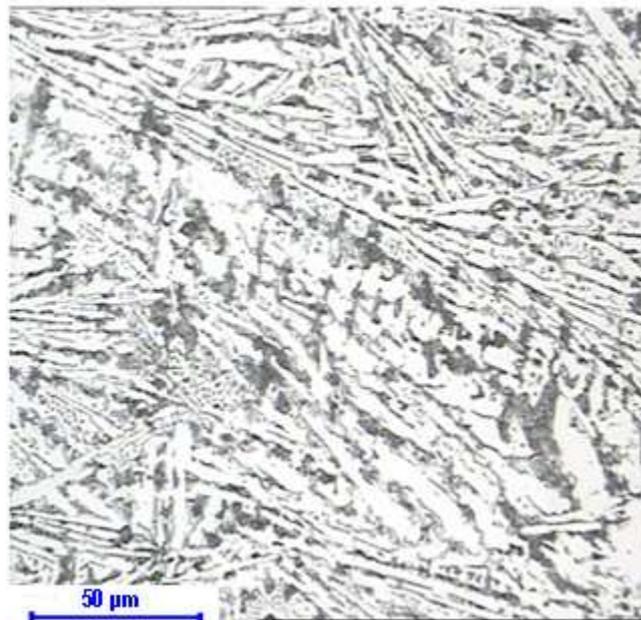


Figure IV.7 : Micrographie de l'échantillon 4 (substrat)

Phases	graphite	lédeburite+quelques ilots de perlite
Composition(%)	9,8	90,2

Tableau IV.4 : Pourcentage volumique des phases et des constituants existants dans l'échantillon 4 (matrice)

La figure IV.8 montre l'existence d'une couche d'accrochage intermédiaire de Ni-Al d'environ 120 μm d'épaisseur.

Par contre la couche d'acier a une épaisseur d'environ 350 μm .

Les deux grossissements de la figure IV.8 nous aident à bien observer que cette couche d'accrochage permet une bonne adhérence de l'acier inoxydable.

On peut expliquer ce phénomène par l'effet mécanique de plasticité du Nickel, il s'adhère facilement sur le substrat et facilite l'adhérence de l'acier inoxydable pendant la projection.

Les zones sombres de la couche intermédiaire du Ni-Al sont aussi des oxydes de NiO et de Al_2O_3 .

Aucune fissure n'est observée sur les deux interfaces existantes.

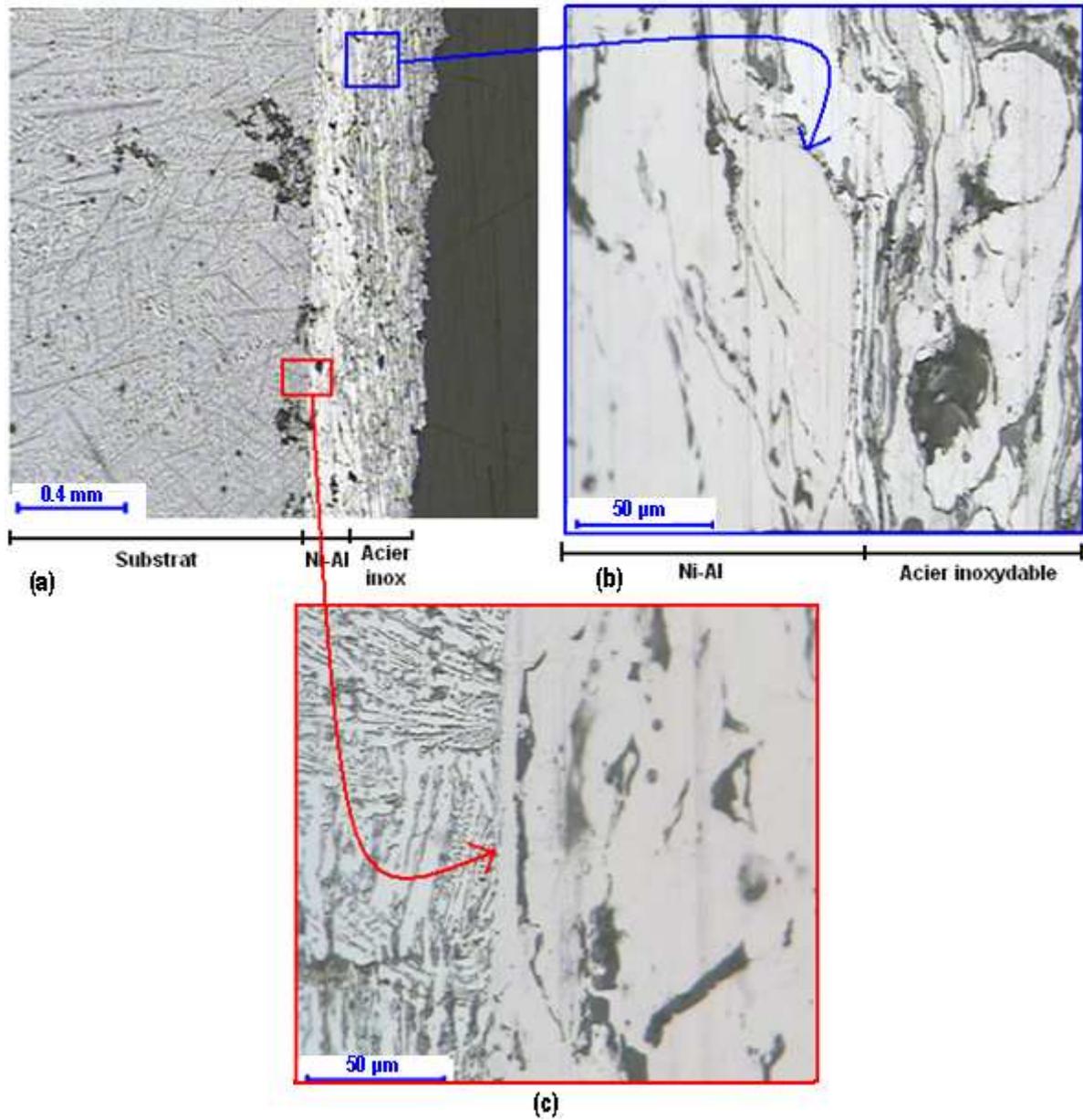


Figure IV.8 ((a), (b) et (c)) : Micrographie de l'échantillon 4 (Interfaces)

La figure IV.8 (d) met en évidence et confirme l'excellente adhésion du substrat à matrice lédeburitique avec Ni-Al et l'inox.

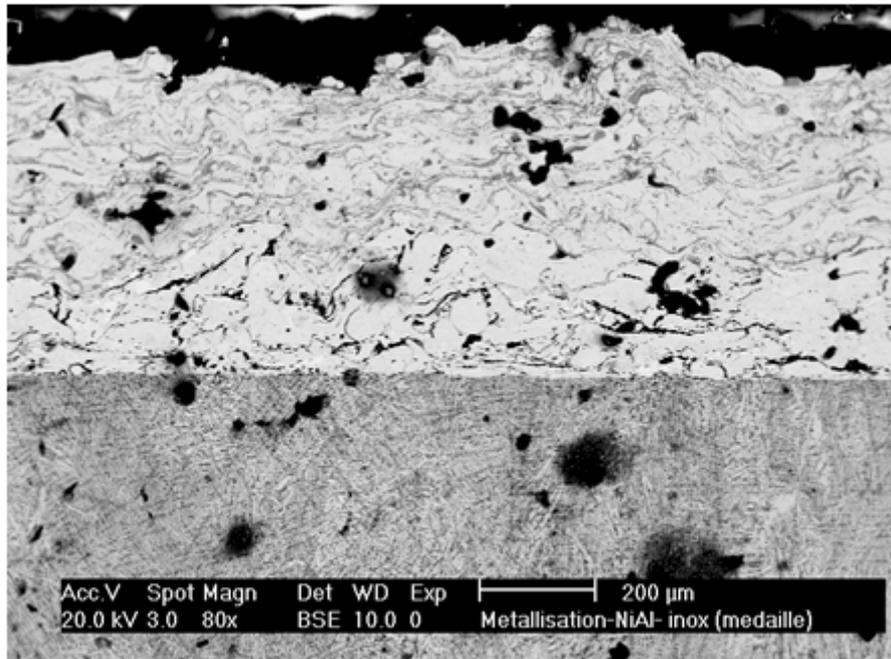


Figure IV.8 (d) : Micrographie de l'échantillon 4 prise au MEB

➤ **Analyse par l'EDX :**

On constate selon la figure IV.8 (e) représentant un profil de concentration de l'ensemble des éléments C, Si, Cr, Ni et Fe que la diffusion est pratiquement inexistante du fait qu'on observe une chute du profil de Cr et aussi pour le Ni aux interfaces.

On conclue qu'il n'existe aucune diffusion entre le Ni-Al---substrat et entre l'inox---Ni-Al.

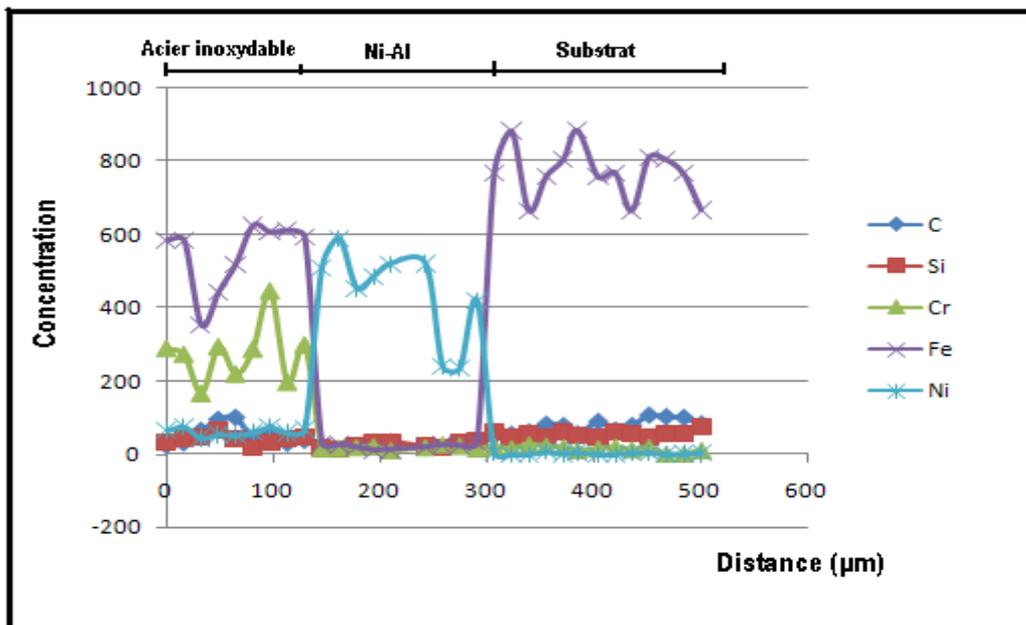


Figure IV.8 (e) : Evaluation des éléments sur la médaille (substrat---couche de Ni-Al---couche d'acier)

IV.2 Essai de traction :

Une étude comparative a été faite entre deux barreaux différents :

- Le premier barreau est métallisé en acier inoxydable sans utilisation de la couche intermédiaire de Ni-Al. **(Ech5)**
- Le deuxième barreau est métallisé en acier inoxydable en utilisant la couche intermédiaire de Ni-Al. **(Ech6)**

Les résultats de cet essai de traction sont représentés dans le tableau IV.5

No Ech.	DIMENSIONS EPROUVETTE (mm)	SECTION (mm ²)	LIMITE D'ELASTICITE $R_{e2\%}$ (N/mm ²)	RESISTANCE A LA RUPTURE R_m (N/mm ²)	ALLONGEMENT $L_0 = 140$ mm A%
Substrat -- inox	D=10.8	91	215	331	12
Substrat --Ni-Al-- inox	D=10.9	93	200	342	10

Tableau IV.5 : Essai de traction des deux échantillons 5 et 6

Les courbes de l'essai de traction des deux échantillons 5 et 6 sont représentées ci-dessous. (Figure IV.9 et IV.10)

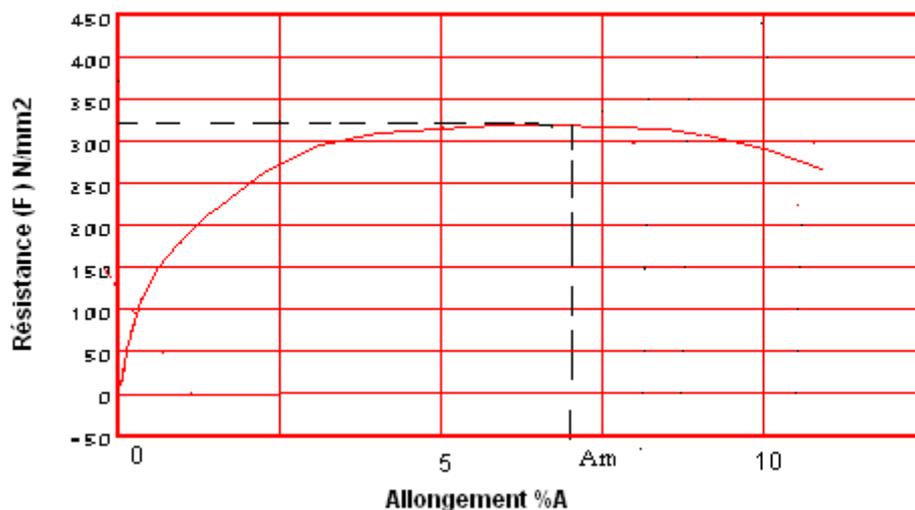


Figure IV.9 : Courbe conventionnelle de traction de l'échantillon 5 (Substrat---couche d'acier inoxydable)

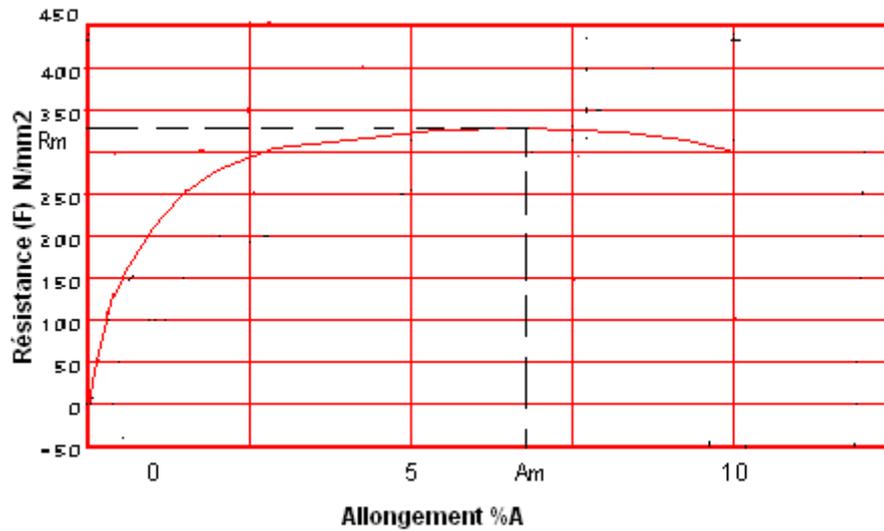


Figure IV.10 : Courbe conventionnelle de traction de l'échantillon 6 (Substrat----couche de Ni-Al----couche d'acier inoxydable)

Il n'existe pratiquement aucune différence. La métallisation ne présente aucun impact sur les propriétés mécaniques de traction, de limite élastique et d'allongement.

➤ **Etude comparative après essai de traction (dépôt à l'inox) et (dépôt Ni-Al----inox) :**

La figure IV.11 montre qu'après un essai de traction, la couche d'acier inoxydable projeté sur le substrat s'enlève complètement, il ne reste aucune trace du dépôt sur le substrat.

Comparativement à la métallisation dont la quelle on a utilisé la couche intermédiaire du Ni-Al, les deux dépôts se sont partiellement décollés. Figure IV.12

Cet enlèvement partiel est du à l'effet d'accrochage du nickel qui est bien collé des deux cotés, que ce soit sur le substrat ou sur le chrome. Les grossissements élevés de la figure IV.12 aident à observer la qualité d'adhérence même après rupture.

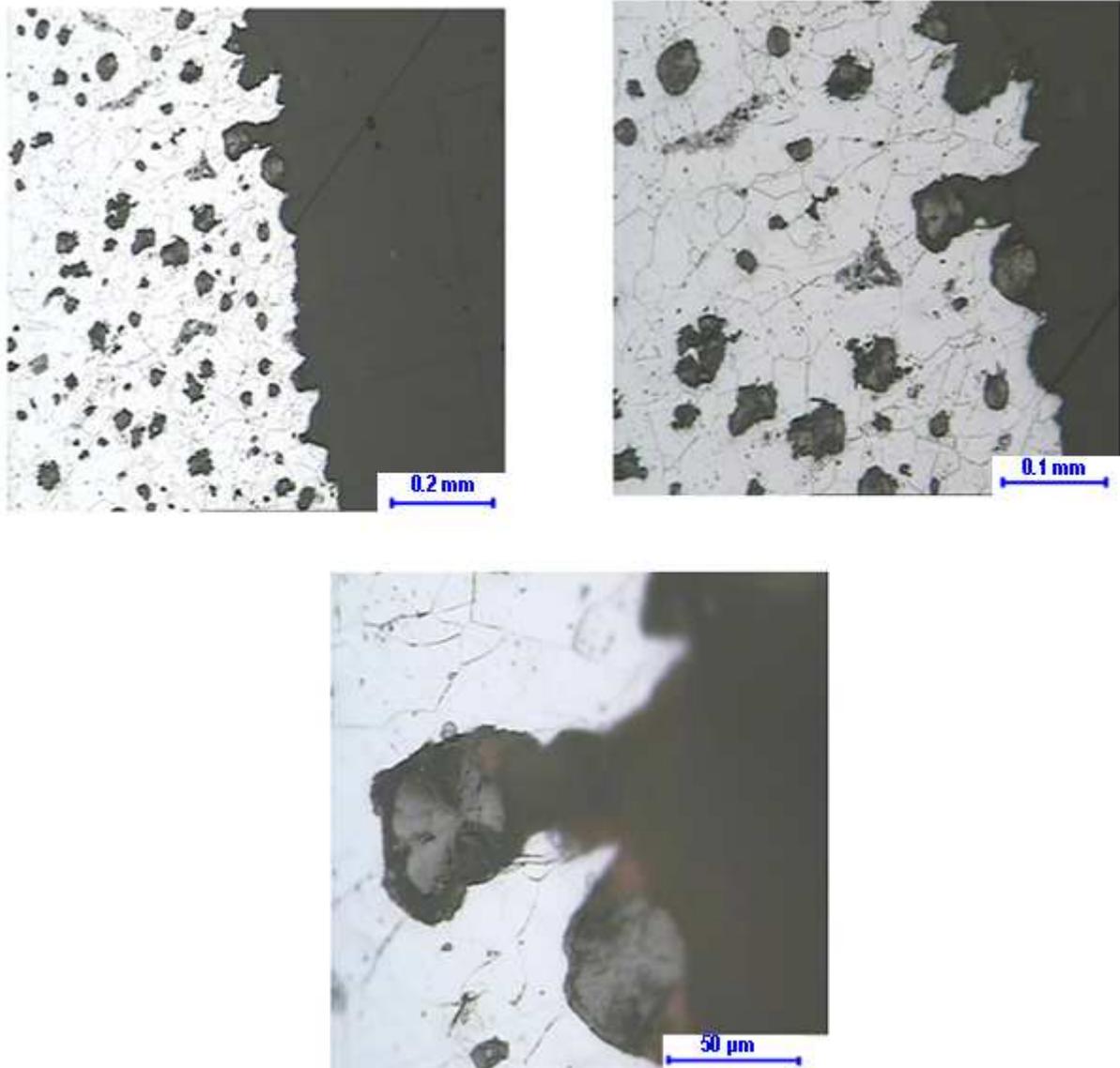


Figure IV.11 : Micrographie de l'échantillon 5 après un essai de traction

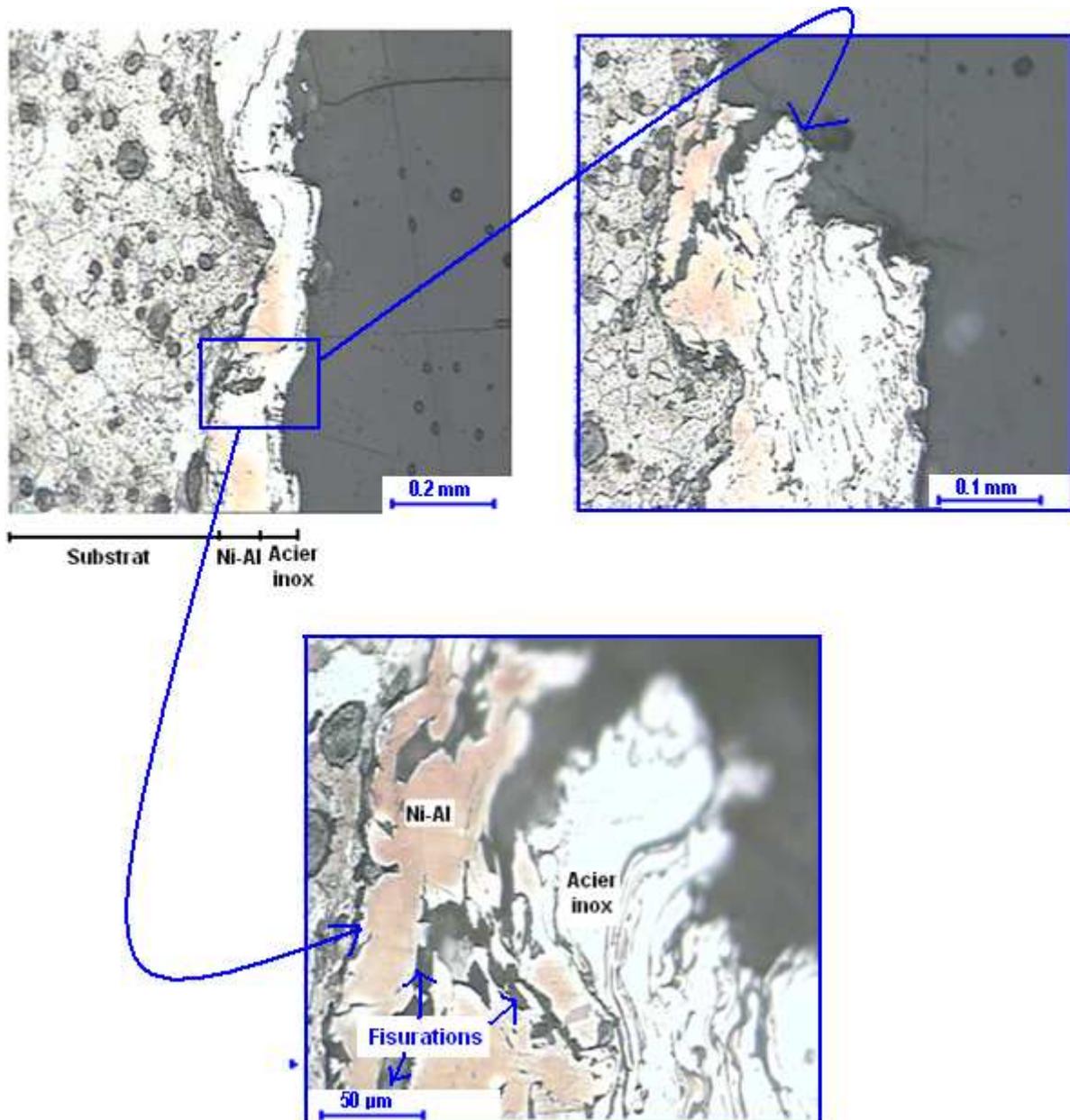


Figure IV.12 : Micrographie de l'échantillon 6 après un essai de traction

IV.3 Essai de pliage :

On a effectué un essai de pliage sur deux barreaux (**ech 7 et ech 8**) pour observer à quel angle la couche projetée se déchausse. Figure IV.13

- **Ech 7** : Barreau (substrat----couche d'acier inoxydable)
- **Ech 8** : Barreau (substrat----couche de Ni-Al----couche d'acier inoxydable)



Figure IV.13 : Essai de pliage d'un échantillon métallisé

On a trouvé pratiquement le même angle de pliage pour le déchaussement des couches projetées thermiquement pour les deux échantillons 7 et 8 et qui est égale à environ 86°.

La métallisation ne présente aucun impact sur les propriétés mécaniques de pliage.

IV.4 Essai de micro dureté :

On a effectué un essai de micro dureté HV sur deux médailles qui ont la même matrice lédeburitique (écha 3 et écha 4).

D'après les figures IV.14 et IV.15, on constate qu'on a une moyenne de micro dureté HV de la matrice lédeburitique qui est égale à 550 HV.

Par contre les deux dépôts utilisés qui sont le Ni-Al et l'inox ont une moyenne de micro dureté HV égale à 180 HV et 220 HV respectivement.

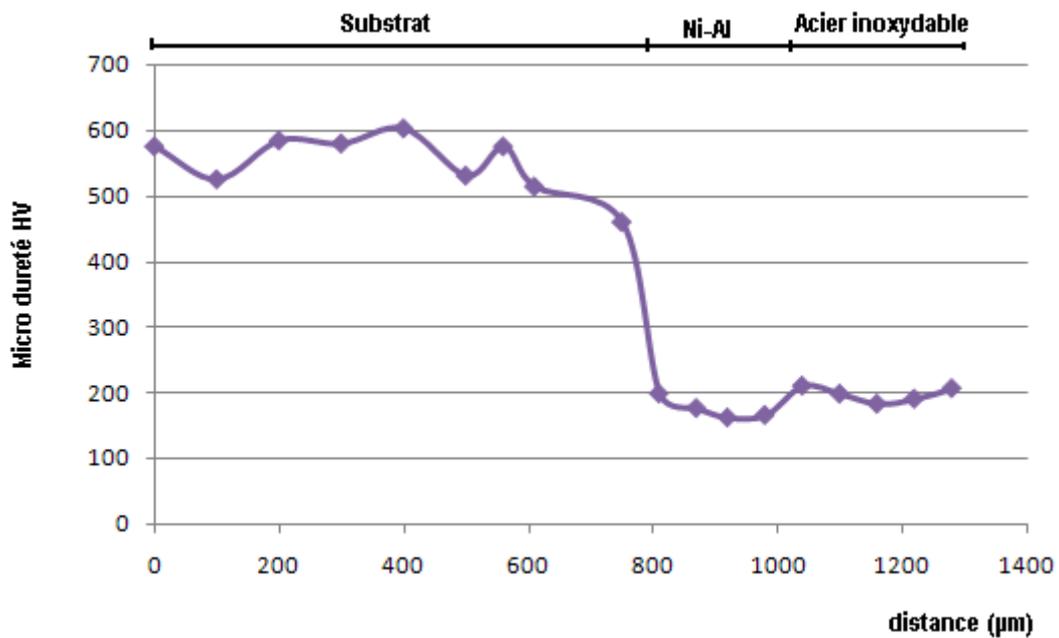


Figure IV.14 : Filiation de micro dureté à travers le métal de base à matrice lédeburitique----couche de Ni-Al----couche d'Inox

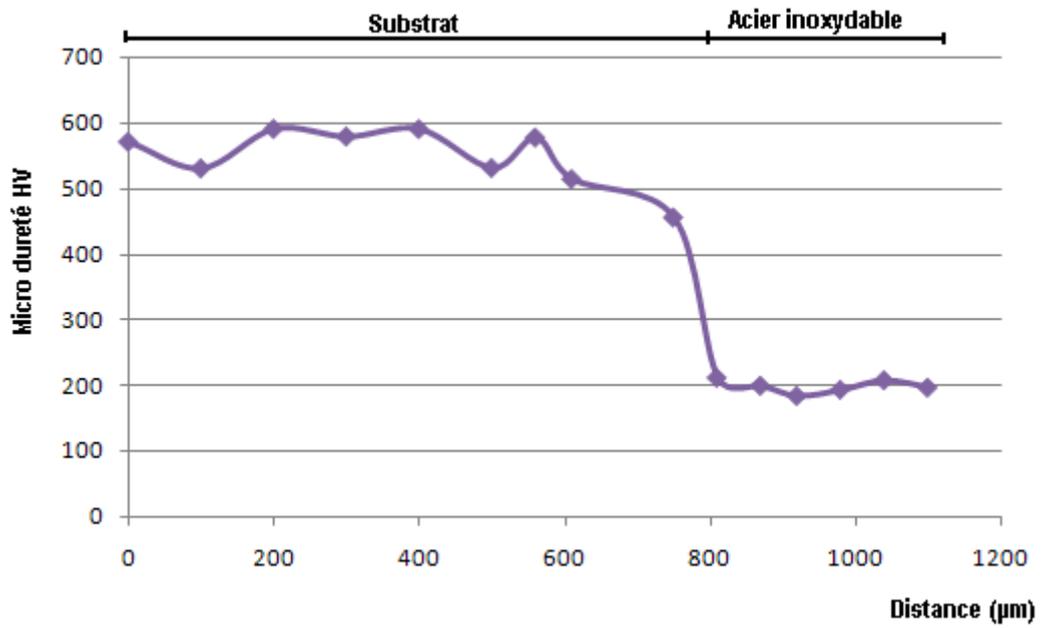


Figure IV.15 : Filiation de micro dureté à travers le métal de base à matrice lédeburitique----couche d'Inox

CONCLUSION GENERALE

L'analyse qualitative et quantitative du métal de base a montré que la matrice de la fonte grise GS issue du moulage en sable (barreau) est de type ferritique et celle issue du moulage métallique en coquille (médaille) est de type eutectique lédeburitique.

- L'adhésion des produits de métallisation est dû principalement à la rugosité de l'état de surface et non à la diffusion ainsi qu'à la ductilité du substrat.
- L'adhésion de l'inox sur le substrat à matrice lédeburitique n'est pas assurée dû au durcissement de la structure contrairement à l'adhésion de l'inox sur le substrat à matrice ferritique qui est meilleure.

Par contre l'adhésion du produit de métallisation Ni-Al sur le substrat à matrice lédeburitique est assurée qui se traduit également par une bonne adhésion de l'inox sur le Ni-Al.

- L'interface entre le substrat et le produit de métallisation est bien apparente (MB----inox) quelque soit l'état structural du MB alors que l'interface (MB----Ni-Al) ou (Ni-Al----inox) pratiquement invisible sur l'ensemble des métallographies.
- L'état structural de l'ensemble des produits de métallisation comprend de nombreux oxydes ayant différentes morphologies de formes aléatoires.
- Les résultats des essais de traction sur les éprouvettes métallisées ne présentent aucune différence par rapport aux éprouvettes non métallisées.
- L'effet de la traction a complètement décollé les produits de métallisation particulièrement dans le cas (MB----inox) contrairement au cas de (MB----Ni-Al----inox) ou l'enlèvement est partiel dû à une adhésion meilleure.
- L'effet du pliage a montré également que le décollement du produit de métallisation apparait à un angle de 86°.

- Les filiations de micro dureté ne révèlent aucune progression au niveau des interfaces qui confirme le non diffusion entre le métal de base (MB) et les produits de métallisation.

Références Bibliographiques

[1] **A. PRONER** ; Revêtement par projection thermique (Technique d'ingénieur, M1645).

[2] **A. PRONER** ; Métallisation par impact (technique d'ingénieur, M1640 ; Année 2008)

[3] **Djamila DJEZIRI** ; Comportement électrochimique d'un dépôt en acier inoxydable réalisé par projection thermique, thèse de magister, Année 2007

[4] **M. VARDELLE** ; Contribution à la modélisation instationnaire et tridimensionnelle du comportement dynamique de l'arc dans une torche de projection Plasma. (Thèse de Doctorat N°45, Année 2000)

[5] **L. PAWLOWSKI** ; Dépôts physiques –Techniques, microstructures et propriétés. Ed PPUR 2003.

[6] **M. VARDELLE, S.BANSARD, P. FAUCHAIS**; La projection thermique : Formation du dépôt et contrôle en ligne du procédé. (Journée Scientifique –Barrières thermiques ONERA 23 mai 2002)

[7] <http://www.surfatec.org/materiaux/divers.htm>

[8] Traitements des métaux. (Technique d'ingénieur, M62 ; Année 2007)

[9] Métallurgie de fonderie T2 (Fontes grises)

[10] Les fontes. Technique d'ingénieur, M113 ; Année 2007)

[11] <http://www.materiaux.ecam.fr/savoirplus/mebanglais/indeex.html>.