

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de mécanique

Mémoire de magister

Spécialité : science des matériaux

APPLICATION DES METHODES NON DESTRUCTIVES

POUR LA CARACTERISATION DES REVETEMENTS

DEPOSES PAR PROJECTION A FLAMME

Par

Aïssa KEFAIFI

devant le jury composé de :

M. Hadji
T. Sahraoui
M. Zergoug
N.E. Bacha

Professeur, U. de Blida
Maître de conférence, U.de Blida
Maître de recherche, CSC. de cheraga
Professeur, U. de Blida

Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

Blida, Octobre 2005

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو المراقبة بدون إتلاف لتأهيل الملابس الموضوع عن طريق الشعلة الحرارية ، قمنا بوضع تلبيس عن طريق الشعلة الحرارية بحيث غيرنا في العوامل العملية المستعملة وذلك للحصول على تلبيسات مختلفة النوعية (المسامية ، الانتظام، الالتحام.....) .
بواسطة طرق المراقبة الغير متلفة (التيار فوكو ، الموجات فوق الصوتية) والمتلفة (تجربة الاقتلاع بواسطة الشد ، المجهر الالكتروني بالمسح) وذلك لتقييم مردود طرق المراقبة بدون إتلاف .
بينت النتائج انه يمكننا تقييم الالتحام بين الملابس و الأساس بواسطة الموجات فوق الصوتية و حالة السطح بتيار فوكو

RESUME

Le but de la présente étude est étudier le contrôle non destructif pour qualifier les revêtements déposés par projection à flamme.

Nous avons déposés des revêtements par la projection thermique à flamme ou des paramètres opératoires variés ont été utilisés afin d'obtenir des différents revêtements de qualité variables (porosité, uniformité, adhérence)

A l'aide des méthodes de contrôle non destructives (courant de Foucault, ultrason) et destructives (test d'arrachement par traction et microscope électronique à balayage) nous avons caractériser les caractéristiques géométrique et mécanique du revêtement, afin d'évaluer la performance et la fiabilité des méthodes de contrôle non destructif.

Les résultats ont montré qu'on peut évaluer l'adhérence entre le substrat et revêtement par les ultrasons et l'état de surface par les courants de Foucault.

Abstract

The Purpose of this is to study the non destructive testing to qualify the coatings deposited by projection with flame

We deposited coatings by thermal projection with flame or where varied operational parameters were used in order to obtain various coatings of quality variable (porosity, uniformity, adherence.....)

Using the methods of non destructive testing (eddy current, ultrasound) and destructive (test of wrenching by traction and electron microscope with sweeping) we have to characterize the characteristics geometrical and mechanical coating, in order to evaluate the performance and the reliability of the methods of non destructive testing.

The results showed that one can evaluate adherence between the substrate and coating by the ultrasounds and the surface quality by the eddy currents.

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
REMECIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	3
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	4
INTRODUCTION	5
1. Projections thermique	6
1.1 Introduction	6
1.2 Principe de la projection thermique	9
1.3 Différents Procédés de la projection thermique	15
1.4 Matériaux utilisés et caractéristiques des métaux projetés	17
1.5 Mécanisme d'adhésion des dépôts	21
1.6 Paramètres opératoires de projection	24
1.7 Domaine d'application	25
2. Contrôle non destructif par courant de Foucault	27
2.1 Introduction	27
2.2 Principes	27
2.3 Théories du contrôle non destructif par courant de Foucault	28
2.4 Diagramme d'impédance normalisé	31
2.5 Caractéristique des courant de Foucault	34
2.6 influence du dimensionnement de la pièce sur les courant de Foucault	35
2.7 leurs avantages et inconvénients	39
3. Contrôle non destructif par ultrason	40
3.1 Introduction	40
3.2 Les différents types d'ondes	40
3.3 L'impédance acoustique	42
4. techniques expérimentables	50
4.1 Introduction	50
4.2 L'élaboration du revêtement	50
4.3 Caractérisation des revêtements	55
4.4 Test d'arrachement	57
4.5 Microscope électronique à balayage	60
5. résultat et interprétation	61
5.1 Caractérisation chimique et micro structural	61
5.2 Contrôle non destructif par courant de Foucault	70
5.3 Contrôle non destructif par ultrason	74
5.4 Test d'arrachement par traction	77
CONCLUSION	83

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1. repères historique de la projection thermique.	9
Figure 2. principe de la projection thermique.	10
Figure 3. installation de la projection thermique à flamme cordon , fils et baguette	11
Figure 4. section du pistolet à projection à flamme pour cordon , fils et baguette	11
Figure 5. pistolet à poudre subsonique	13
Figure 6 . pistolet à tir discontinu	14
Figure 7. pistolet à tir continu	15
Figure 8. coupe d'une torche à plasma	16
Figure 9. matériaux utilisés	17
Figure 10. différents types de particules écrasées selon HOUBEN	22
Figure 11. écrasement des particules sur les aspérités de la surface	23
Figure 12. principe du contrôle par les courants de Foucault	28
Figure 13 répartition des courant de Foucault	30
Figure 14. L'impédance de la bobine avant et après le test	32
Figure 15. l'influence des différents paramètres sur le tracés de diagramme d'impédance Normalisé	33
Figure 16. variation de conductivités en fonction de l'état de surface	35
Figure 17. variation de la conductivité de la pièce	36
Figure 18. pénétration des courants de Foucault en fonction des paramètres électromagnétiques	37
Figure 19. variation de conductivité en fonction du pénétration	38
Figure 20. comportement des courants de Foucault avec la variation de l'épaisseur	38
Figure 21. ondes longitudinale	41
Figure 22. ondes transversale	41
Figure 23. propagation d'une onde ultrasonore plane normalement à la surface de Séparation de deux milieux d'impédances acoustique Z_1 et Z_2	43
Figure 24. double réflexion et réfraction des ultrasons a la frontière entre deux milieux, Avec conversion de mode	44
Figure 25. illustration schématique d'un expérience montrant en évidence le phénomène de rétrodiffusion	46
Figure 26. Déplacement latéral du faisceau réfléchi	47
Figure 27. composition chimique du substrat	51
Figure 28. éprouvette pour la déposition	51
Figure 29. éprouvette de test d'arrachement par traction	51
Figure 30. le chalumeau ROTOTEC 80	54
Figure 31. chaîne de mesure ultrasonore	56
Figure 32. illustration de la cuve	57
Figure 33. éprouvette de test d'arrachement selon la norme ASTM C 633 – 79	58
Figure 34. différents cas possible lors de test d'arrachement par traction	59
Figure 35. photo MEB de la poudre LUBROTEC 19885	61
Figure 36. la composition chimique de la poudre LUBROTEC 19885	62
Figure 37. Photo MEB de la poudre ULTRABOND 50000	62
Figure 38. composition chimique de la poudre ULTRABOND 50000	63
Figure 39. Section transversal du revêtement LUBROTEC 19885	63
Figure 40. section transversal de l'échantillon n° 1	64
Figure 41. section transversal de l'échantillon n°2	65

Figure 42. section transversal de l'échantillon n°3	65
Figure 43. composition chimique de revêtement	67
Figure 44. composition chimique à l'interface	67
Figure 45. composition chimique du substrat	67
Figure 46. section transversal de l'échantillon n° 5	68
Figure 47. section transversal de l'échantillon n° 6	68
Figure 48. variation de l'impédance de l'échantillon n°1	71
Figure 49. variation de l'impédance de l'échantillon n°2	71
Figure 50. variation de l'impédance de l'échantillon n°3	72
Figure 51. variation de l'impédance de l'échantillon n°4	72
Figure 52. variation de l'impédance de l'échantillon n°5	73
Figure 53. variation de l'impédance de l'échantillon n°6	73
Figure 54. échogramme de l'échantillon n°1	75
Figure 55. échogramme de l'échantillon n°2	75
Figure 56. échogramme de l'échantillon n°3	76
Figure 57. échogramme de l'échantillon n°4	76
Figure 58. échogramme de l'échantillon n°5	77
Figure 59. échogramme de l'échantillon n°6	77
Figure 60. test d'arrachement par traction de l'échantillon n°1	78
Figure 61. test d'arrachement par traction de l'échantillon n°2	78
Figure 62. test d'arrachement par traction de l'échantillon n°3	79
Figure 63. test d'arrachement par traction de l'échantillon n°4	79
Figure 64. test d'arrachement par traction de l'échantillon n°5	80
Figure 65. test d'arrachement par traction de l'échantillon n°6	80
Figure 66. évolution du contrainte d'adisions pour les échantillons	81
Tableau 1. Caractéristiques des poudres de projection de la procédé ROTOTEC 80	52
Tableau 2. Paramètre opératoire de la projection thermique	53

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à monsieur N.E, BACHA professeur à l'université SAAAD DAHLEB, BLIDA, qui m'a confié cette étude et a contribué à son bon déroulement. Je lui suis très reconnaissant pour la confiance qu'il m'a accordée, son expérience et son objectivité qui m'ont vraiment aidés à faire ce travail et apprendre beaucoup de choses.

Je remercie très sincèrement monsieur M.HADJI, professeur à l'université SAAD DAHLEB, BLIDA, pour l'honneur qu'il m'a fait de présider ce jury .

Je tiens à exprimer tous mes remerciements à monsieur M.ZERGOUG, maître de recherche et chef de laboratoire de procédés électrique et magnétique du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle, CHERAGA qui a bien voulu examiner mes travaux en me faisant l'honneur de participer au jury.

J'adresse mes remerciements également à monsieur T.SAHRAOUI maître de conférence à l'université SAAD DABLAB, BLIDA pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de le juger.

Je tiens également a remercie toutes personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Introduction

Les pièces mécaniques qui subissent des efforts extérieurs permanents ou elles perdent leurs propriétés superficielles, sont considérées comme un problème nécessitant une résolution rapide, aussi la pénurie des pièces de rechange nous incite à étudier des revêtements métalliques sur des pièces usées surtout mécanique, arbre, vilebrequins,... Etc.) Remise ainsi à la cote d'origine et récupérées souvent, les propriétés particulières pour des fins de protection du revêtement s'avèrent intéressantes notamment dans le cas de frottement-usure, fatigue et la corrosion.

De ce fait, de nombreux traitements de surface ont été mis au point et utilisés industriellement pour faire face à ces exigences. Parmi ces traitements il y a la projection thermique. Les revêtements ont souvent été adaptés comme solution au problème tribologique du fait qu'ils apportent au métal de base des propriétés superficielles nettement supérieures. Il existe plusieurs types de revêtements utilisés: les dépôts céramiques, les dépôts métalliques, les dépôts plastiques,etc.. Le choix d'un type de dépôts dépend essentiellement des conditions de travail auxquelles sera confrontée la pièce.

Malgré les caractéristiques particulières en surface, les pièces réalisées pouvant présenter en service certaines défaillances dues aux sollicitations généralement complexes auxquelles elles sont soumises. Parmi les problèmes rencontrés, figure l'adhésion du dépôt au substrat et la fissuration à l'interface.

Notre étude consiste à examiner la qualité d'un revêtement déposé à l'aide d'un chalumeau à flamme oxyacétylénique par les méthodes non destructives. L'emploi de méthodes NDT, pour la caractérisation des revêtements permis de contrôler les dépôts sur site, sur une chaîne de production sans passer par les méthodes destructives souvent onéreuses et de mise en œuvre difficile.

Dans ce travail nous présentons les matériaux utilisés (substrat et revêtement), la technique de la projection thermique et le contrôle non destructif (courant de Foucault et ultrason) et une caractérisation physico-chimique.

Ce travail est clôturé par une conclusion émanant les différentes expérience et des conditions opératoires.

Chapitre 1

Projection thermique

1-1 Introduction: [1] [2]

C'est en 1909 le docteur SCHOOP observa incrustation du plomb suite à un tir d'une balle contre un mur en ciment, ce dernier eut l'idée d'obtenir des revêtements métalliques par projection, il a tout d'abord déposer des matériaux à bas point de fusion comme le plomb, en pulvérisant, à l'aide d'un fluide chauffé, du métal fondue, mais les difficultés était considérables. L'appareil utilisé était intransportable et souvent le métal se refroidissait au cours de la pulvérisation et n'étai plus dans l'état physique voulu pour former un revêtement lors de son impact, pour cela il a amélioré le procéder en projetant le métal sous forme de poudre, à travers une flamme, malheureusement il n'était pas facile d'obtenir un revêtement et un débit de poudre régulier, c'est pourquoi dès 1913 le docteur SCHOOP remplaças la poudre par un fil métallique entraîné par deux molettes.

Les propriétés particulières de ce type de revêtement s'avèrent intéressantes et l'utilisation de la projection thermique se développe de plus en plus. La figure 1.1 présente quelques repères historiques dans l'évolution de la technologie.

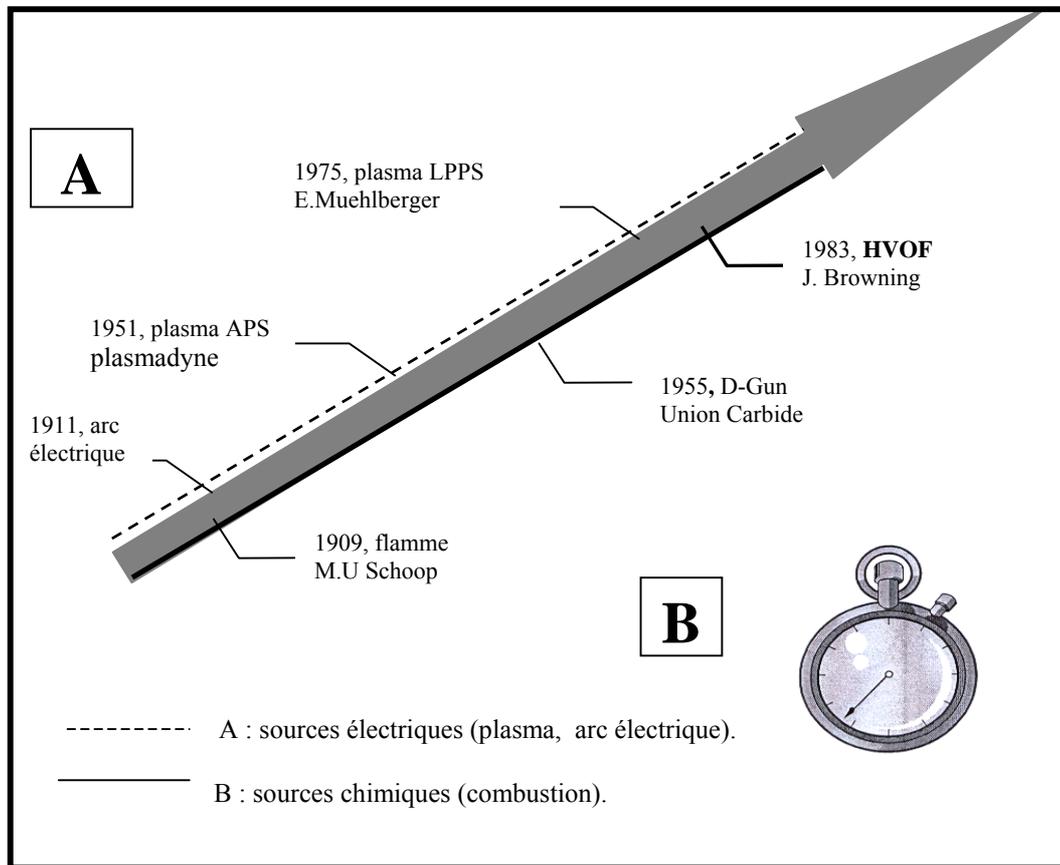


Figure 1.1 Repères historiques de la projection thermique [3]. [4].

1.2. Principe de la projection thermique

Les projections thermiques sont des procédés particuliers de dépôt où les particules solides sont injectées dans un gaz à haute température, elles y sont chauffées, fondues, accélérées, et projetées à grande vitesse sur un substrat où elles forment un dépôt de gouttelettes étalées, comme la montre la figure 1.2.

Le processus est dit à « froid » c'est-à-dire que le substrat est chauffé à des températures très inférieures à celles atteintes par les particules projetées. Les particules subissent des transformations physiques, elles sont fondues puis refroidies à des vitesses de refroidissement élevées, le revêtement est construit particule par particule et a une structure lamellaire [4].

Les propriétés des revêtements dépendent du matériau du départ, des microstructures obtenues, des contraintes résiduelles produites lors de la projection et de la porosité du dépôt. Cependant le système de revêtement / substrat est un matériau composite dont les propriétés dépendent aussi de la structure et des propriétés à l'interface présentes.

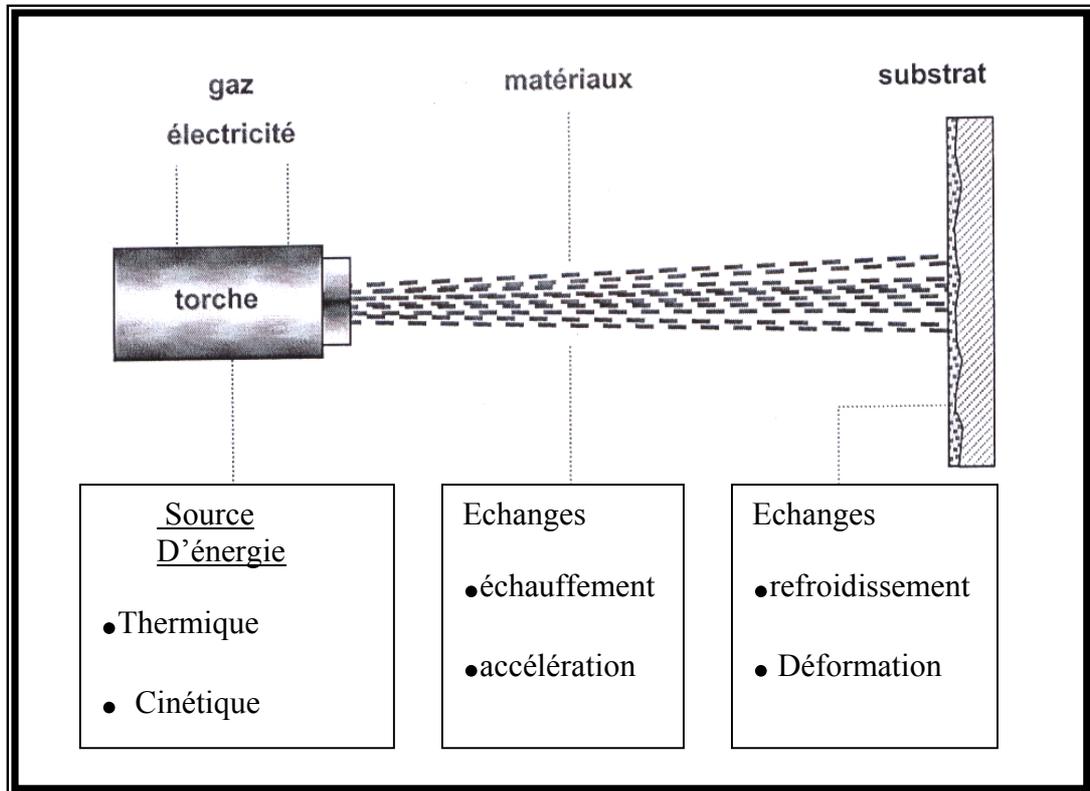


Figure 1.2 Principe de la projection thermique.[4]

1.3 Différents procédés de la projection thermique

Les procédés de projection thermique commercialisés peuvent être divisés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée : flamme ou arc électrique

1.3.1 Projection à flamme

L'énergie thermique utilisée provient de la combustion de gaz, les matériaux qui ne se subliment pas à 2760°C peuvent être projetés à la flamme. Les matériaux utilisées sont les métaux ou alliages métalliques sous forme de fils, cordons ou de poudre.

1.3. 1. 1. Projection à flamme ou fils, cordons ou baguettes

Le matériel peut être soit manuel ou automatisé. Le matériau est projeté après avoir été fondu par les flammes sortant des trous de la buse à gaz, est soufflé par de l'air sous pression qui le propulse sur un substrat, après l'avoir dispersé en fines particules. des exemples de ces procédés sont schématisés aux figures 1.3 et 1.4 [5].

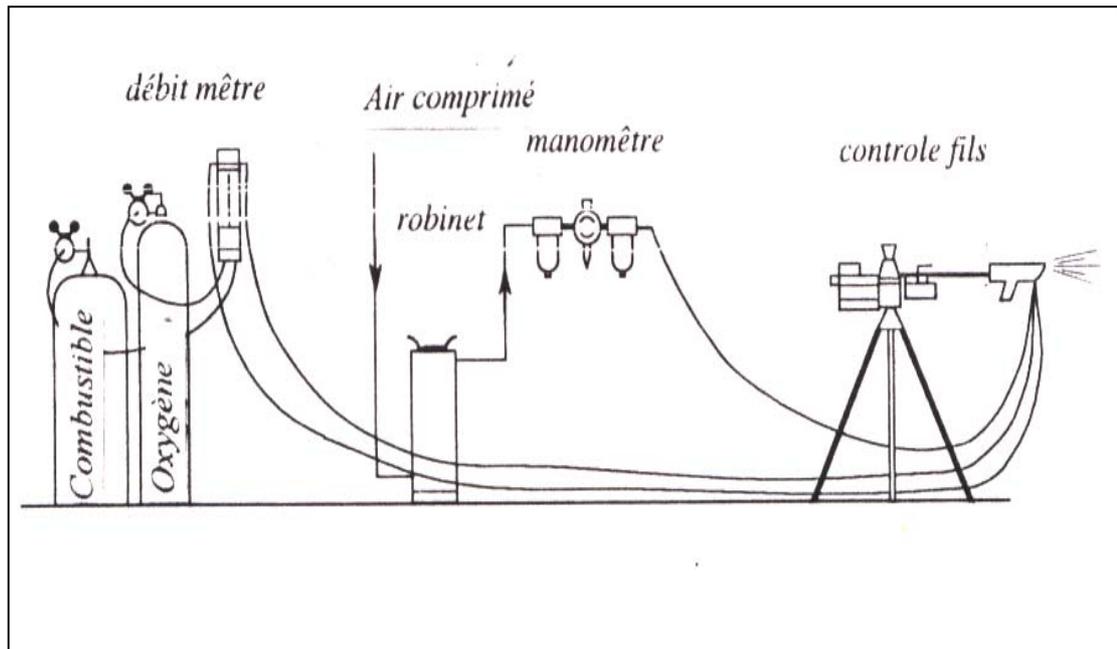


Figure 1.3 installation de la projection thermique à flamme
Cordon, fils et baguette [6].

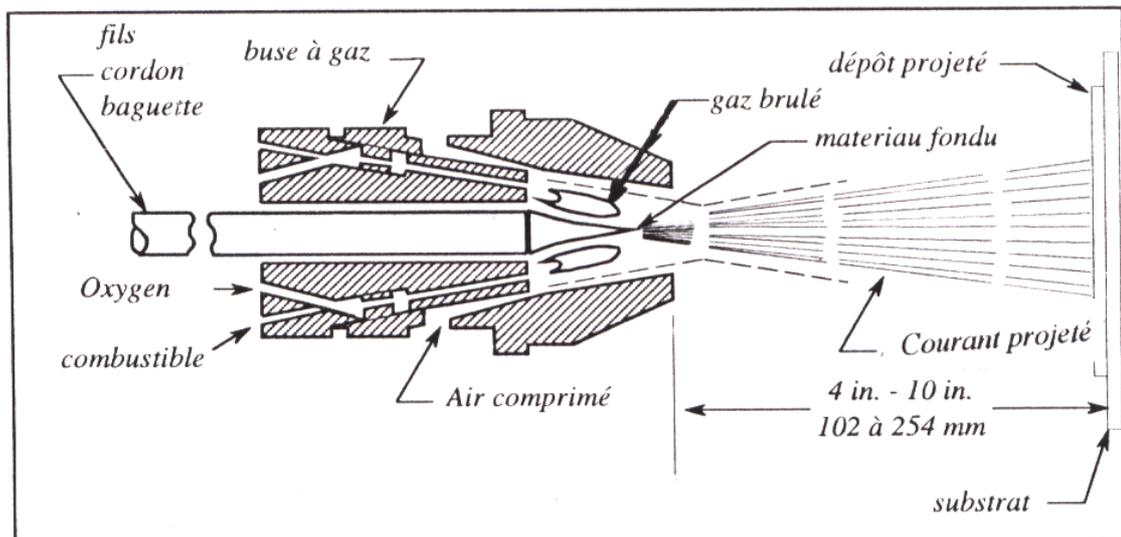


Figure 1.4 section du pistolet à projection à flamme pour Cordon, fils et baguette [6].

1.3. 1. 2. Projection flamme, poudre

Dans ce groupe, nous trouvons trois types de matériels, les torches à gaz, les pistolets à poudre subsonique, les pistolets à poudre hypersonique. Les installations nécessaires sont en générale simples mais elles peuvent nécessiter un automatisme poussé, ou la distribution de la poudre est précise et équivalente à ceux utilisés en projection plasma.

a. Torche à gaz

Il s'agit de chalumeau oxy-gaz (en général oxy-acétylénique) utilisé en soudure autogène équipé d'un petit récipient contenant les poudres. Celles-ci tombent par gravité dans la canalisation d'un gaz de combustion et sont entraînées par celui-ci jusqu'à la buse, pour être introduite dans la flamme qu'elles traversent à faible vitesse avant d'arriver au support à recharger.

La distance de la buse au support est très faible (quelques millimètres) ce qui permet à la flamme d'assurer la fusion de la poudre et le chauffage du support.

La poudre arrive ainsi au substrat chaud mais non fondu et une liaison de type brasure est assurée entre les matériaux d'apports et le métal de base. Les matériaux d'apports sont des alliages dits auto fusible à base de Nickel ou de Cobalt avec les éléments d'additions tel que le chrome, le tungstène, le bore et le silicium [6].

b. Pistolet à poudre subsonique

Ces pistolets utilisent un mélange oxy-acétylénique. La poudre est stockée dans un réservoir qui peut être intégré au pistolet ou indépendant, et dans ce cas relié au pistolet par un tuyau flexible. La poudre est donc entraînée jusque dans la flamme par sa mise en suspension dans l'un des gaz. La figure 1.5 illustre ce principe de fonctionnement.

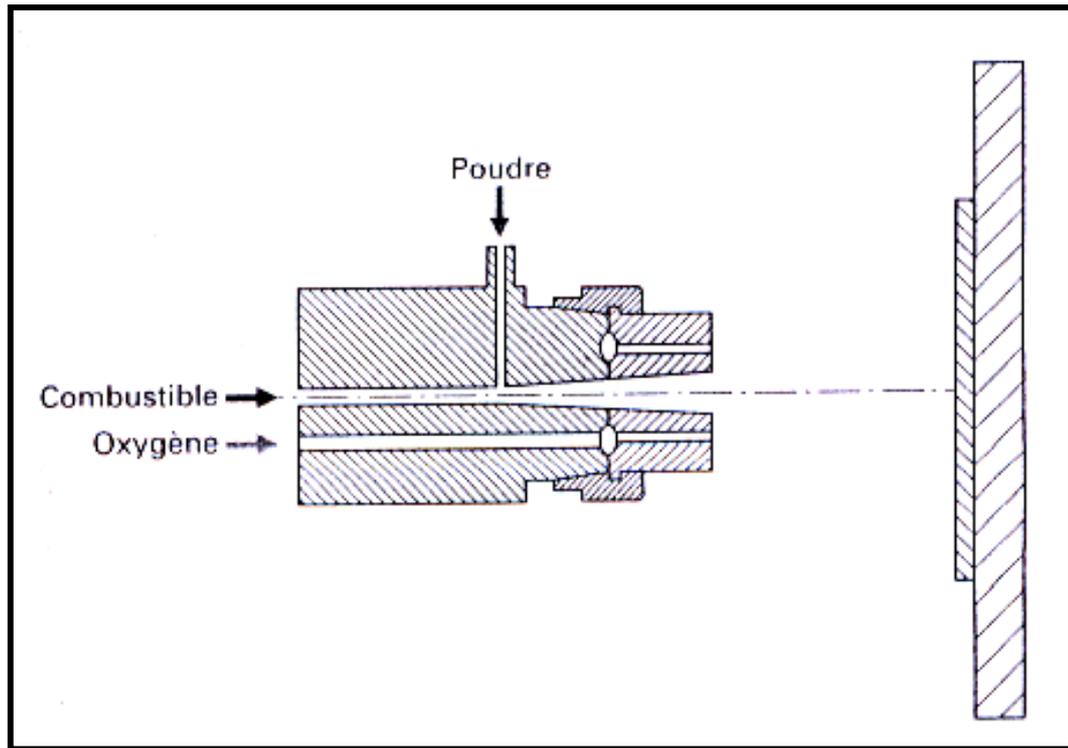


Figure 1.5 pistolet à poudre subsonique [1].

Les dépôts obtenus avec ce matériel présentent en général, une adhérence moyenne, une faible cohésion des particules entre elles, et une porosité élevée à cause de la faible vitesse des particules. Le transport de la poudre peut aussi se faire avec un jet d'air comprimé ou bien avec un des gaz neutres. Ces améliorations arrivent à augmenter les qualités des dépôts réalisés avec ce type de matériel. Leur utilisation est centrée sur les matériaux de type auto-fusible ou auto-adhérent.

Ce matériel est apprécié pour son faible degré de nuisance (faible niveau de bruit). On le trouve dans toutes les industries pour résoudre les problèmes de réparation et quelques fois traiter des pièces neuves, sollicitées en abrasion, corrosion, usure, isolation thermique.

c. Pistolet à poudre hypersonique

Ce type de matériel peut se diviser en deux catégories :

- ❖ Pistolet à tir discontinu (canon à détonation) :

La poudre à projeter est introduite dans une chambre avec les gaz de combustion (acétylène, oxygène), ce mélange explose au moyen d'une étincelle comme le montre la figure 1.6.

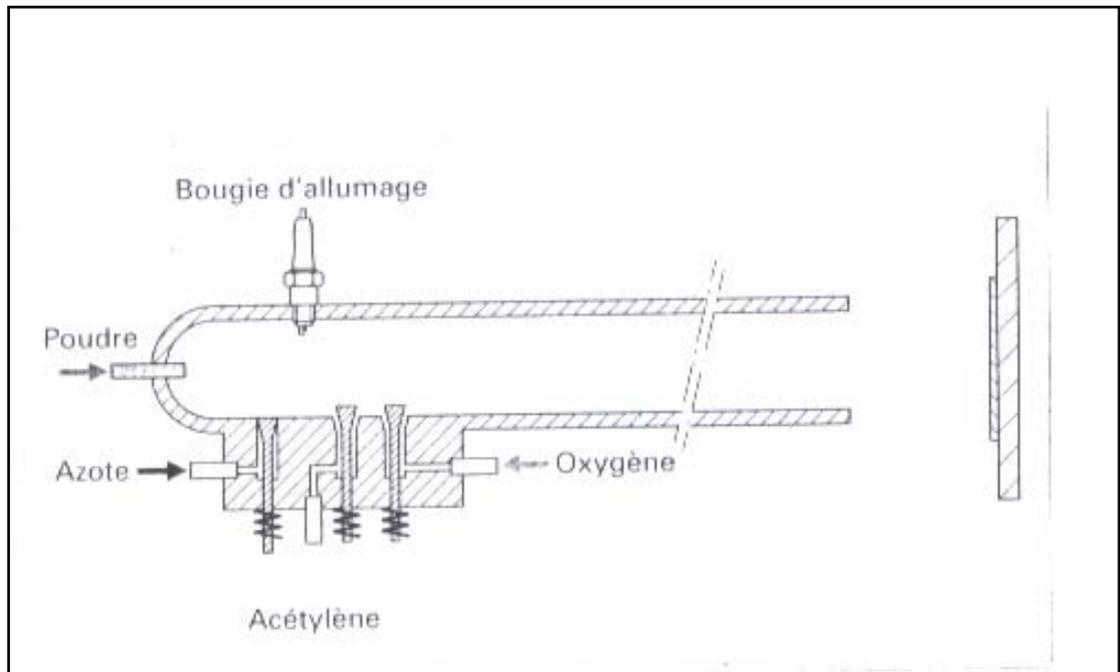


Figure 1.6 pistolet à tir discontinu [1].

La poudre est injectée à grande vitesse dans un tube de 25 mm de diamètre et 1 m de longueur. L'onde de choc produite accélère et chauffe les particules qui sont injectées à l'extérieur du tube. La vitesse des particules est d'environ 800 m/s. Les tirs sont effectués automatiquement (jusqu'à 8 détonations par seconde). Les épaisseurs des dépôts obtenus sont limitées à 0,3 mm et ont une rugosité R_o moyenne d'environ $0,3\mu\text{m}$. L'adhérence du dépôt peut dépasser 175 Mpa.

Les revêtements obtenus avec ce type de matériel sont denses et très adhérents.

❖ Pistolet à tir continu

Leurs applications peuvent être soit manuelle, soit automatique. Il utilise comme principe de base un jet à combustion interne (Rocket) qui donne des vitesses de gaz hypersonique (plus de 5 fois la vitesse du son). La poudre introduite dans le gaz d'échappement de le Rocket est concentrée pour être conduite à l'intérieur de la buse qui peut atteindre 300 mm de longueur et est refroidit par eau. La figure 1.7 montre une coupe

du pistolet à tir continu. Cet appareil réalise des dépôts du même type que le canon à détonation et peut projeter des carbures et des oxydes métalliques, des alliages et des métaux.

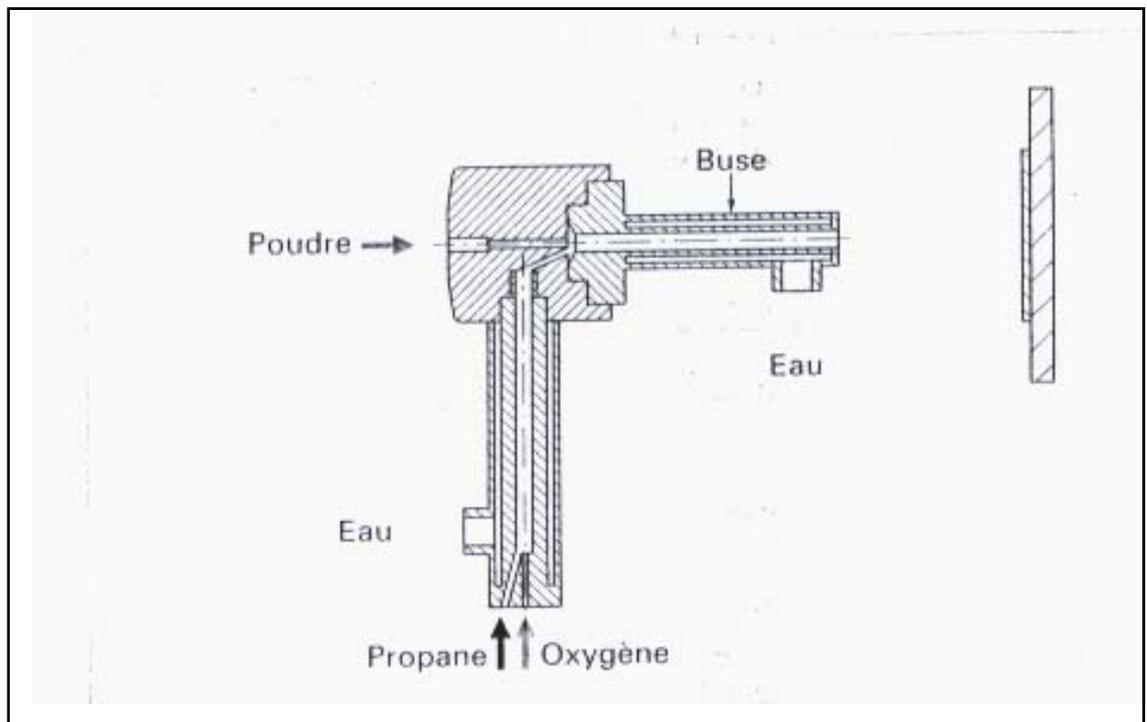


Figure 1.7 pistolet à tir continu [1].

1.3. 2. Projection thermique à l'arc électrique :

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédé. On trouve deux familles de matériels qui utilisent cette énergie.

- Le pistolet à arc électrique entre deux fils
- Le pistolet plasma.

a. Pistolet à Arc électrique entre deux fils

Le principe consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables. Le métal fondu dans l'arc étant ensuite projeté sur le support à revêtir par un jet d'air comprimé. Ces pistolets sont alimentés par des générateurs de courant continu. Les tensions à l'arc sont comprises entre 25 et 40 V, et les intensités entre 100 et 400 A pour des fils de 1,5 à 2 mm de diamètre, l'air comprimé nécessaire doit être propre et sec, et doit avoir un débit d'environ 25m³/h pour une pression d'utilisation de 5 bars.

b. Pistolet plasma

Le pistolet plasma utilise la décharge électrique d'un arc électrique capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous une faible tension comme le montre la figure 1.8.

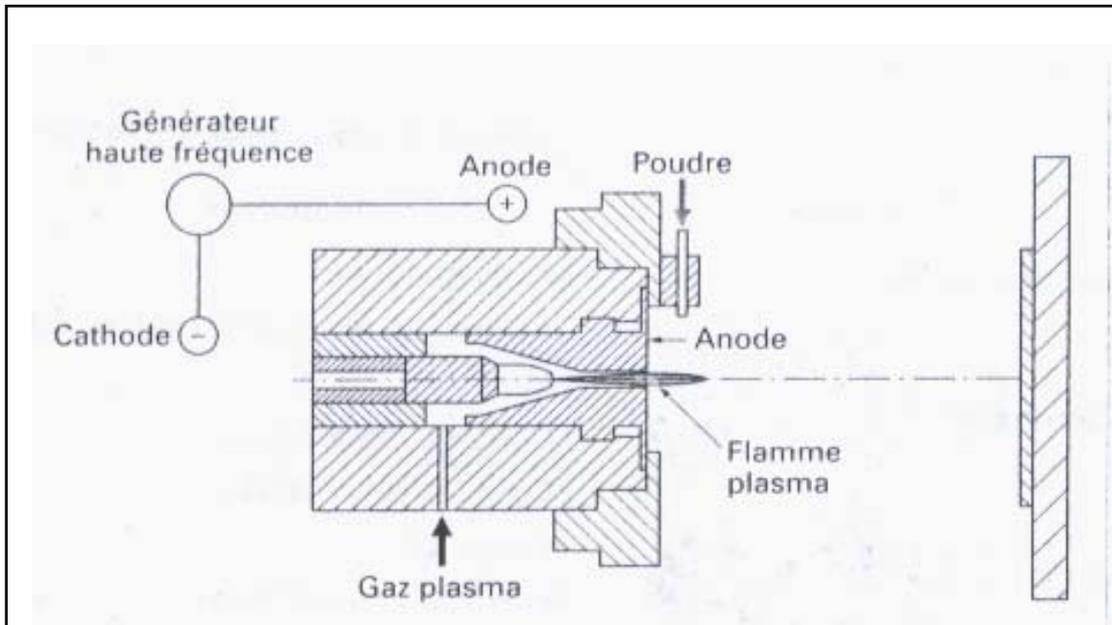


Figure 1.8 Coupe d'une torche à plasma [1].

Le pistolet à plasma est un appareil dans lequel on injecte un mélange de gaz à travers un arc électrique confiné par des parois froides. Il comporte généralement une électrode négative (cathode) en tungstène et une électrode positive (anode) en cuivre, toutes deux refroidies par une circulation d'eau sous pression.

Le gaz est injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique et s'échappe par la tuyère anodique. Les pistolets utilisent des gaz plasmagènes comme l'argon, l'azote avec l'addition d'hydrogène ou d'hélium.

On distingue deux modes de fonctionnement, un plasma à arc interne (ou arc soufflé) dans lequel le jet de plasma ne conduit pas le courant à l'extérieur de la tuyère et un plasma à arc externe (ou transféré) dans lequel le jet de plasma est entièrement parcouru par le courant, le circuit électrique se referme sur la pièce à traiter qui joue le rôle d'anode extérieure.

1.4. Matériaux utilisés et caractéristiques des métaux projetés :

1.4. 1. Matériaux utilisés [5]

Les matériaux projetables comprenant tous les types et tous les mélanges de céramiques, carbure, plastiques et métaux existant sous forme de poudre ou de fils comme la montre la figure 1.9.

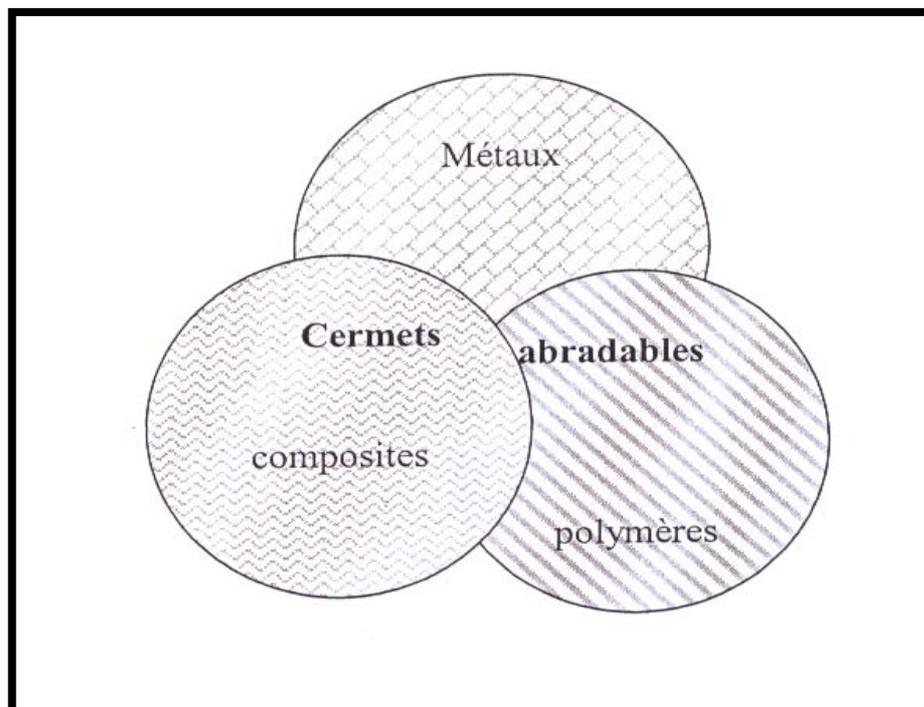


Figure 1.9 matériaux utilisés. [4].

Nous pouvons les classer de façon suivante :

- Les aciers alliés et non alliés.
- Les aciers à base de Nickel.
- Les aciers à base de Cuivre.
- Les alliages de base de Cobalt.
- Les alliages de Zinc.
- Les carbures.
- Les oxydes.

- Les auto-adhérents (alliage à base Ni-Al).
- Les nitrures.
- Les siliciures.
- Les Céramiques.
- Les matériaux abradables (type Ni-graphite).
- Les métaux antifriction.
- Les matières plastiques (polyamide, polyéthylène).

Ces différents matériaux ne se présentent pas tous la même forme car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et des procédés employés pour les projeter.

Les principales formes commercialisées sont :

- Les fils nus massifs ou les fils fourrés
- Les poudres
- Les cordons
- Les baguettes

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux matériels flamme et arc : ils étaient largement diffusés dans les catégories métaux purs et les aciers. Ce type de produits est défini par leur diamètre et leur composition.

Les poudres quant à elles, sont tenues à répondre à des critères plus nombreux que les fils :

- Composition
- Dimension des particules et leur répartition granulométrie
- Forme des particules sphériques, lamellaires, cubiques...
- Type d'élaboration : électrofondues, frittées, agglomérées, mélangées, enrobées, composites.
- Coulabilité.
- Densité.

Les poudres sont employées aussi bien pour les techniques à flamme que pour les plasmas.

Les cordons permettent de conditionner les matériaux non tréfiabiles et obtenir un produit continu pouvant alimenter des pistolets à fils. Ces types de produits sont définis par leur composition et leur diamètre.

Par contre les baguettes obtenues par frittage, permettant de conditionner des matériaux non tréfiabiles pour alimenter de façon discontinue des pistolets à fils. Tous ces produits sont utilisés suivant les besoins et les types de projection thermique.

1.4. 2. Caractéristiques des matériaux projetés

Les caractéristiques essentielles des matériaux projetés [6] [7] [8] [9].

1.4. 2. 1. La densité

Les dépôts projetés à chaud dans l'air et non traités à posteriori sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La densité des dépôts dépend aussi de la taille des particules et de leurs vitesses ainsi que du taux d'oxydes formés pendant la projection.

Les dépôts d'aluminium peuvent avoir, suivant la vitesse du dépôt et la température, une porosité de l'ordre de 25% dans le cas de la projection à flamme est de 5% dans le cas de la projection plasma. La densité des dépôts projetés est fonction de la porosité, et sa valeur varie entre 5 et 25% au-dessus de la densité théorique du produit.

1.4. 2. 2. Dureté

Les matériaux projetés théoriquement sont constitués de particules juxtaposées et liées entre elles. Ceci se traduit en général par une dureté sans rapport avec la densité de chacune des particules, mais représentative de la compacité du dépôt. La dureté des dépôts obtenus dépend toujours des paramètres opératoires de la projection.

1.4. 2. 3. Structure

Lors du contact avec le substrat, les particules, grâce à leur énergie cinétique élevée se déforment en forme de cylindre. Cette déformation a été modélisée par MADESJSKI par

la formule suivante, obtenue en négligeant les tensions de surface et que la goutte liquide s'aplatit avant de se solidifier :

$$\frac{D}{d} = \frac{1.29 \rho v d^{0.2}}{\mu} \quad (1.1)$$

Ou :

D : Diamètre moyen de la particule

d : Diamètre initiale de la particule

ρ : Densité du liquide

μ : Viscosité du liquide

v: Vitesse d'impact de la particule

Pour réaliser la fusion des particules dans le jet de gaz chaud, il faut prendre en compte de nombreux variables du matériau tels que le coefficient du transfert thermique, la conductibilité thermique et la température de fusion.

Les valeurs ont été combinées dans une équation de conduction thermique et dynamique de gaz pour donner l'équation suivante :

$$\frac{S (k \Delta T)^2}{v \mu} \geq \frac{(LD)^2}{16 \rho} \quad (1.2)$$

(Jet) (Particule).

Ou :

S : Distance de projection

K : Conductivité thermique de la couche

ΔT : Gradient de température de la couche

μ : Viscosité de jet de gaz

L : Capacité thermique de la particule par unité de volume à la température de fusion

D : Diamètre moyen de la particule

ρ : Densité de la particule.

D'après l'équation (1. 2) le temps de séjour de la particule dans le jet de gaz et la taille de la particule sont importants pour que la fusion complète soit correcte. Le temps de

séjour de la particule est déterminé par les vitesses de gaz, l'énergie (conductivité thermique) et la distance de projection.

Il a été constaté par les essais de modélisation que suivant les paramètres de projection et la nature du matériau, les caractéristiques des dépôts doivent changer.

1.4. 2. 4. Adhérence

Les dépôts projetés adhèrent en général aux substrats par accrochage mécanique qui demande une préparation soignée de la surface à revêtir. La particule en fusion épouse plus ou moins bien les rugosités du substrat suivant les matériaux à projetés et les paramètres de projection.

1.5. Mécanisme d'adhésion des dépôts [10]

1.5. 1. L'écrasement des particules :

L'écoulement de la solidification des particules fondues lors de leur impact sur le substrat est un problème extrêmement complexe au plan théorique, d'autant que les mesures sont très difficile sur des phénomènes dont la durée moyenne se situe autour de 10 μ S.

Le problème est encore plus complexe lorsqu'il faut prendre en compte la rugosité de la surface, l'énergie cinétique et la température des particules, la mouillabilité particules substrat

Un récent développement de HOUBEN qui prend en compte la propagation des ondes de choc au sein des particules lors de leur écrasement, permet suivant la vitesse, le diamètre et la température moyenne des particules au moment de l'impact de définir trois types de particules écrasées comme la montre la figure 1.10.

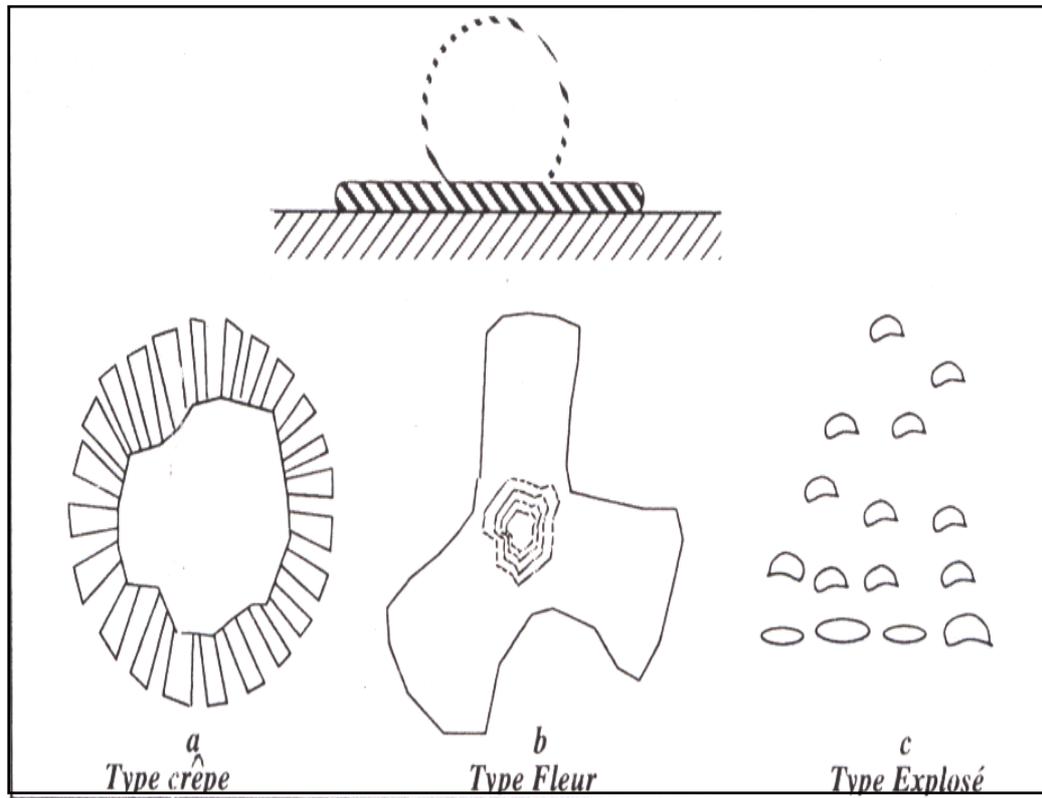


Figure 1.10 : Différents types de particules écrasées selon HOUBEN [10]

- Le type Crêpe (figure. 1.10. a) relativement un bon contact entre la particule et le substrat ou les couches précédemment déposées.
- Le type fleur (figure. 1.10. b) Avec une surface de contact étroite au centre et des « pétales » sans contact avec le substrat.
- Le type explosé (figure. 1.10.c) correspond à des particules surchauffées ;

La façon dont les particules s'écrasent et le contact entre lamelle qui en résulte, ont une grande influence sur les propriétés thermomécaniques de dépôt. En dépit de son importance ce phénomène est mal connu, et donc mal contrôlé et ce d'autant plus que la surface sur laquelle s'écrasent les particules n'est jamais plane et que l'on dépose une espèce de cordon plus ou moins épais.

Ces théories aussi imparfaites soient elle, s'accordent cependant sur la vitesse de refroidissement de particules qui peuvent facilement atteindre 10^7 K /s avec de temps de solidification inférieur à $10\mu\text{s}$.

1.5. 2. Adhésion des dépôts

C'est la propriété la plus importante, il est maintenant admis que les mécanismes d'adhésion sont les suivants :

A. Accrochage mécanique :

Il est considéré comme le mécanisme le plus prépondérant. La rugosification permet d'améliorer l'accrochage mécanique.

L'écrasement des particules sur les aspérités et serrage en se contractant au refroidissement. L'accrochage augmente avec la rugosité de la surface comme montre la figure 1.11.

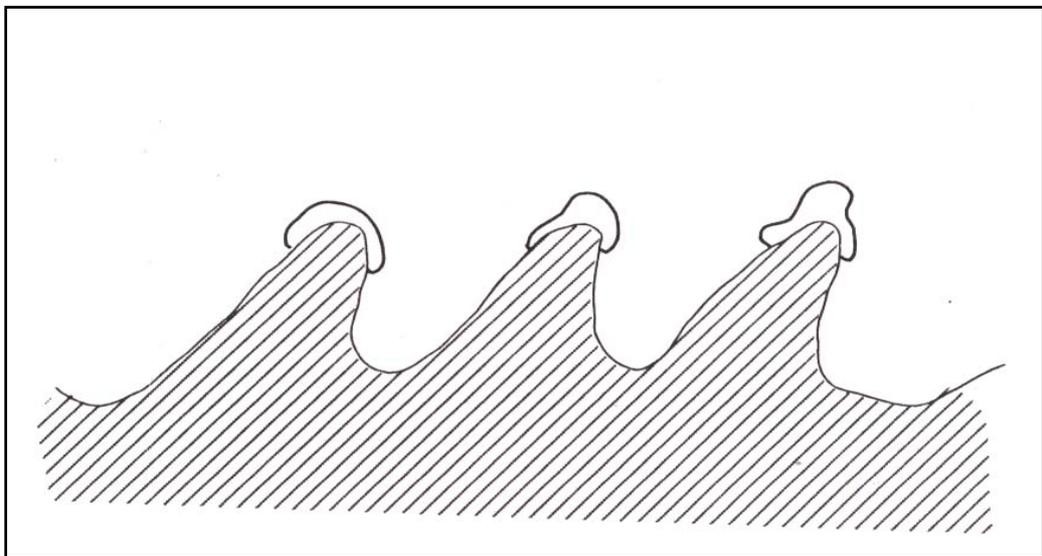


Figure 1.11 Ecrasement des particules sur les aspérités de la surface.[10]

Le tir doit être effectuée dans les minutes qui suivent la rugosification afin de limiter les risques d'oxydations et dans tous les cas de bien nettoyer le substrat. Enfin, l'adhésion est d'autant meilleure que les particules ont une bonne plasticité ou une faible viscosité et une bonne mouillabilité lorsqu'elles sont liquides lors de l'impact.

b. Adhésion chimique

Dans ce cas le substrat et le matériau à projeter présente une affinité chimique avec la formation d'un alliage ou d'un composé intermédiaire. C'est le cas par exemple de

la formation de FeMO ou Fe₂MO lors de la projection des particules de molybdène sur un substrat de Fer.

1. 6. Paramètres opératoires de projection

Les principaux paramètres à prendre en compte lors de la projection thermique pour un équipement donnée:

- ❖ Les débits de gaz.
- ❖ La puissance de la torche.
- ❖ La distance de tir.
- ❖ L'angle d'incidence.
- ❖ La rugosité.
- ❖ Le préchauffage.

a. Débit des fluides

Ceux-ci ont une influence sur les caractéristiques du dépôt. La composition préconisée du mélange oxy-gaz doit également être rigoureusement respectées conformément aux abaques. Dans la plupart des cas, les mélanges sont près de la stoechiométrie en favorisant légèrement, soit l'oxygène, soit le gaz en fonction du produit et des caractéristiques des dépôts à obtenir.

b. L'angle d'incidence :

La projection sur un substrat est généralement avec un angle de 90°, dans ce cas le dépôt s'accroche normalement et homogène. Si cet angle est inférieur à 45° C, la porosité du dépôt augmente ainsi alors que la cohésion entre les particules diminue.

c. Distance de tir :

Ce paramètre varie de 60 mm à 250 mm, suivant le type de projection employé la distance de projection joue un rôle dans les caractéristiques des dépôts tels que la porosité,

l'adhérence, la cohésion, le temps de résidence des particules dans la flamme, le surchauffe du substrat et par conséquent l'augmentation des contraintes résiduelles et l'oxydation

d. Sous couche d'accrochage :

L'adhérence peut être améliorée par la projection d'une sous couche d'accrochage dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,05 à 0,2mm qui joue un rôle multiple :

- Amélioration de la mouillabilité substrat / sous couche / dépôt.
- Adaptation des coefficients de dilatation relatif substrat / dépôt.

e. Rugosité :

Après nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité en surface de la pièce à revêtir, afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les irrégularités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Cette ultime préparation doit être faite avec beaucoup de soin, et elle constitue comme nettoyage, un facteur important pour la bonne tenue des dépôts. La géométrie de surface peut être obtenue par :

- Traitement par impact.
- Préparation mécanique des surfaces suivies d'un traitement par impact.

Le choix de la technique de préparation dépend de la nature du revêtement et son épaisseur.

I.7. Domaine d'application [7] [9].

La projection thermique offre un éventail important de revêtement protecteurs ou fonctionnels peuvent être déposés sur des matériaux de base très différents, la possibilité de déposer une palette importante du matériau sur des substrats soit métalliques, céramiques ou encore certains matériaux synthétiques telles que des epoxy renforcés, sans affecter les propriétés du substrat, ouvre un champ d'application très élevée à cette technologie. Les fonctions les plus importantes du point de vue du volume actuel d'application pour la projection thermique sont les suivantes :

- Résistance à l'usure par abrasion.
- Résistance à l'usure par érosion.
- Résistance à l'usure adhésive.

- Protection anti-fretting.
- Protection anticorrosion aux gaz chauds.
- Protection anticorrosion au milieu liquide.
- Protection contre l'oxydation.
- Barrière thermique.
- Protection contre les chocs thermiques.
- Isolation électrique.
- Effet catalyseur.
- Augmentation de rendement des machines tournantes par optimisation des jeux (revêtement abrasables).
- Effet décoratif.
- Revêtement bioactif et biocompatible.
- Réduction des vibrations et du bruit.
- Revêtement réflecteur.
- Pseudo-alliage Cu-w, Al-Mo..... etc.
- Formage des éléments de machine.
- Supraconductivités.
- Conductivité ionique à température élevée.

Cette liste non exhaustive montre la diversité des possibilités de la projection thermique du point de vue fonction des dépôts réalisés.

CHAPITRE 2

CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANT DE FOUCAULT

2. 1. Introduction

Le premier contrôle par courant de Foucault fut réalisé par de HUGUES, au début de 1879. L'extrême sensibilité des courants de Foucault aux caractéristiques du matériau rendit le contrôle difficile et imprécis. Ce n'est qu'en 1926 que le premier instrument de contrôle par courant de Foucault fut mis au point pour la majeure des épaisseurs. A la fin de la seconde guerre mondiale, des recherches poussées ont permis le développement des courant de Foucault, et par conséquent augmenter le champs d'application de ce contrôle.

2.2. Principe

Lorsque un courant alternatif est appliqué à un solénoïde (bobine) un champs magnétique (H_p) variable se produit quand celui-ci rencontre un métal conducteur, il induit des courants parasites appelés courant de **FOUCAULT** (physicien Français, (1819-1908). Ces derniers créent en retour un champs magnétique (H_s) qui s'oppose au champs primaire (bobine) provoquant une réduction nette du champs, comme la montre la figure 2.1, ceci entraîne une variation de l'impédance de la bobine qui dépend entre autre des deux paramètres suivants:

- conductivité électrique σ .
- perméabilité magnétique μ .

On peut détecter avec cette technique des variations dues : [11] .

- à la composition chimique du matériau ;
- à la structure (effet du traitement thermique);
- aux dimensions de la pièce ou a l'entrefer pouvant exister entre le solénoïde et le matériau.
- à la présence d'un défaut dans le matériau.

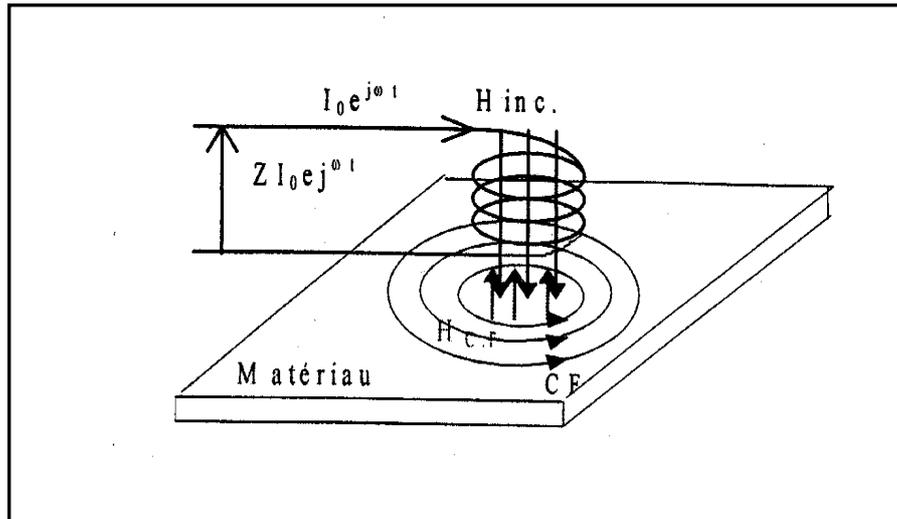


Figure 2.1: Principe du contrôle par les courants de Foucault. [12].

2.3. Théorie du contrôle non destructif par courant de Foucault

2.3.1. équation gouvernant la génération des courant de Foucault [13] [14].

Les lois mathématiques régissent les courants de Foucault sont celle de l'électromagnétisme vérifiées par les équations de J-C Maxwell.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{Rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

\vec{E} : Champs électrique.

\vec{B} : Induction magnétique

ε_0 : Permittivité magnétique

ρ : densité de courant.

2.3.2. Répartition des courants de Foucault

La répartition des courants de Foucault est très importante dans la définition des caractéristiques du matériau. En effet elle est dépendante de sa structure, conductivité électrique, perméabilité magnétique, géométrie de la pièce, ou de toute anomalie dans le matériau (changement dimensionnels, présence des défauts tels que fissures, piqûres, ...etc.) entraîne la modification du parcours et intensité du courants de Foucault [15]

- la variation du flux dans le capteur entraîne une variation d'impédance.
- Pour le contrôle d'un matériau non ferromagnétique, la présence des courants de Foucault modifie les composantes de l'impédance, l'énergie magnétique des courants induits se déduisent de celle de la bobine, ce qui conduit à une diminution de la composante inductive [15].
- Dans le cas des matériaux ferromagnétiques, si l'échantillon n'est pas saturé, l'énergie magnétique mise en jeu pour le capteur se trouve multipliée par la perméabilité relative et la composante inductive augmente. La composante résistive augmente mais à une moindre proportion, puisque la pénétration des courants induits est réduite de plusieurs paramètres dans le calcul et l'interprétation du contrôle par courants de Foucault; A cet effet, la solution est la saturation du matériau. Pour un matériau ferromagnétique saturé (perméabilité relative tend vers unité), les courants induits se comportent de la même manière qu'un matériau non ferromagnétique [10] .
- Les courants de Foucault suivent les trajectoires fermées sur des plans perpendiculaires au flux magnétique induit. Leurs intensités dépendent de la profondeur de la pièce. La figure 2.2 montre le rapport existant les densités de courant et la surface et un point x à l'intérieur du matériau.

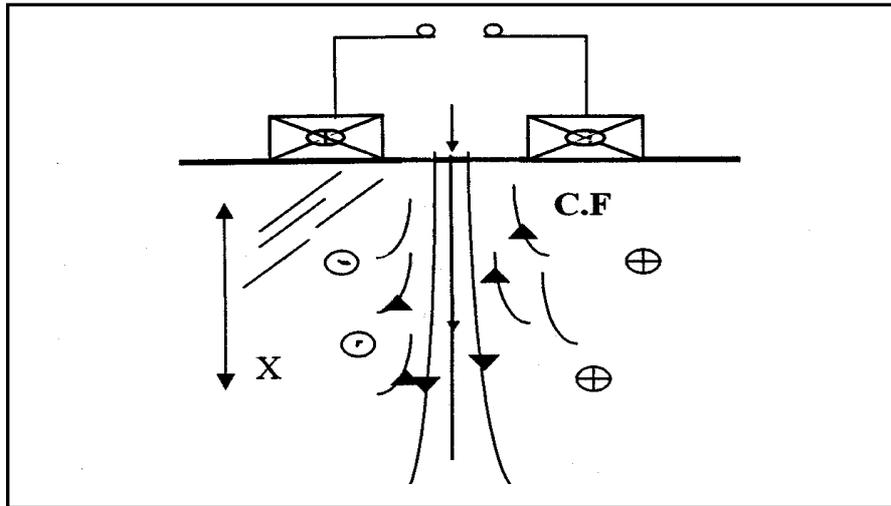


Figure 2.2: Répartition des courant de Foucault [12] [13]

Elle est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{j_x}{j_0} = e^{-\beta} \sin(\omega t - \beta)$$

$\frac{j_x}{j_0}$: est le rapport de la densité du courant de Foucault.

J_x : densité de courants à la profondeur x .

J_0 : densité de courants à la surface.

2.3.3. La profondeur standard [16]

La profondeur de pénétration standard est la profondeur à laquelle la densité des courants de Foucault vaut 37% de la valeur de la surface, elle dépend de la résistance électrique et de la fréquence.

$$\delta = 50 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}$$

Où

f : la fréquence du contrôle (du signal traversant le capteur) en Hz.

μ_r : est la perméabilité magnétique relative (sans unité).

ρ : est la résistance électrique en micro ohms.

δ : Profondeur standard en mm.

Cette relation permet de déduire la pénétration des courants dans les matériaux. Ce paramètre est important dans la mesure ou il permet de quantifier les courants de Foucault.

Ces derniers subissant un déphasage qui est fonction de la profondeur transversale [16].

$$\beta = \frac{x}{\delta} = \frac{x}{50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}}$$

x : Etant la distance par rapport a la surface de la pièce en (mm).

Lorsque la fréquence augmente la profondeur de pénétration diminue. Dans ce cas les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface du matériau (effet de peau). Le choix de la fréquence dépend donc essentiellement de la profondeur à contrôler [18].

2.4. Diagramme d'impédance normalisé

2.4.1. Plan d'impédance

L'interprétation des résultats du contrôle par courants de Foucault est obtenue directement en connaissant la valeur de l'impédance du capteur à tout moment du contrôle.

Un capteur à courant de Foucault sans la présence d'un échantillon à contrôler, possède une valeur z_0 dite impédance à vide, dont les parties résistives et inductives sont successivement R_0 et L_0 .

La présence de l'échantillon modifiée la valeur de l'impédance du capteur Z_1 dont la partie résistive est R_1 et la partie inductive est L_1 comme la montre la figure 2.3.

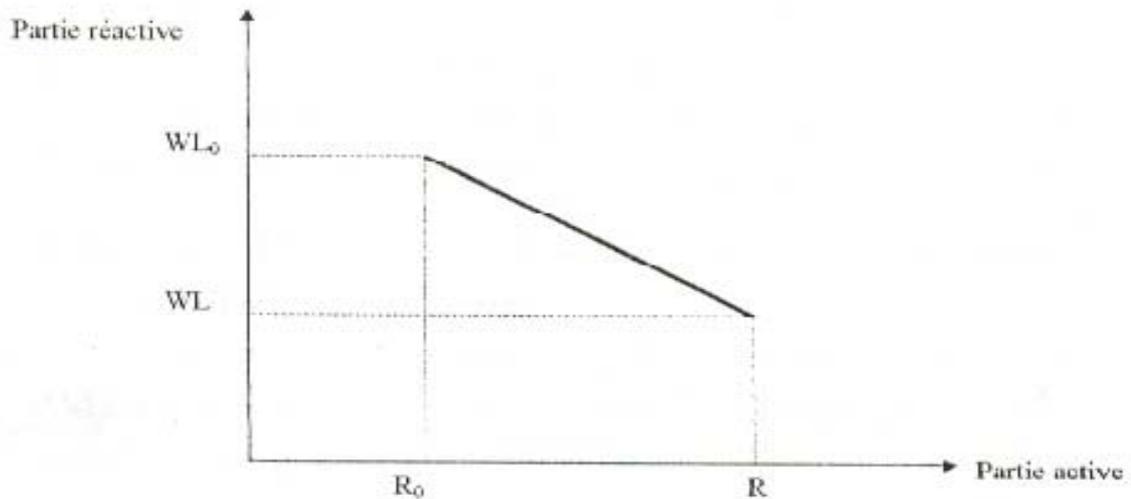


Figure 2.3: Impédance de la bobine avant et après le test [17].

Le tracé de la partie inductive en fonction de la partie résistive, donne le diagramme d'impédance qui est l'outil indispensable pour l'interprétation des résultats pour le contrôle non destructif par courant de Foucault.

- l'augmentation de la fréquence à partir de zéro provoque l'apparition des courants de Foucault, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance apparente de la bobine. Par la suite, ces courants induisent une diminution du flux, d'où une décroissance de la réactance.
- Les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface lorsque la fréquence augmente, ils créent un champ en opposition avec le champ induit, le flux total à l'intérieur du métal diminue.
- Pour une fréquence très élevée, le flux total tend vers zéro (l'effet de Peau), les courants de Foucault étant localisés à la surface, il en résulte une diminution des parties résistives et réactives de l'impédance qui tendent vers zéro.

2.4.2. Variation des paramètres dans le diagramme d'impédance

Il est possible, par le diagramme d'impédance normalisé, d'analyser la variation physico-chimique de l'échantillon. Tous les paramètres du matériau (dimension, caractéristique électriques ou magnétique) permettent une représentation semi circulaire à mesure qu'ils augmentent ou qu'ils diminuent [14].

Cette représentation est montrée à la figure 2.4.

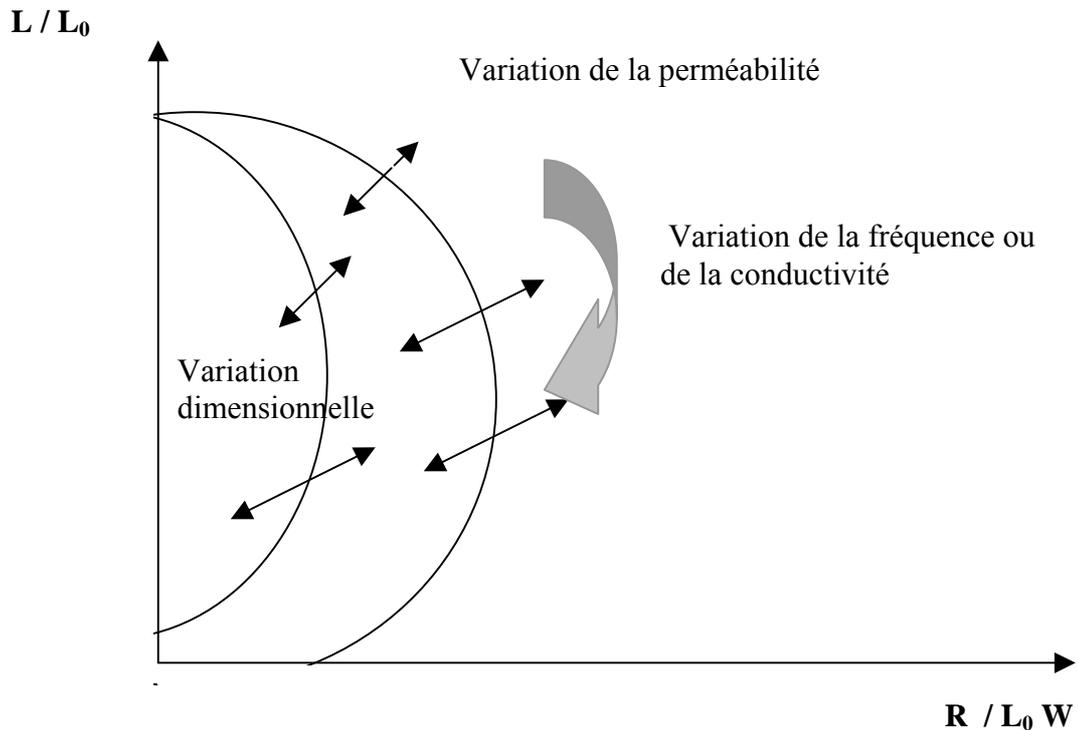


Figure 2.4 : L'influence des différents paramètres sur le tracé du diagramme d'impédance normalisé. [15] [18]

Pour des caractéristiques constantes de l'échantillon (conductivité électrique, perméabilité magnétique et dimensions) une augmentation de la fréquence de contrôle fera descendre le facteur de remplissage (caractérisé l'adaptation du capteur à l'échantillon à examiner) vers le bas du diagramme.

- Une augmentation de la résistivité (en gardant les autres paramètres constants) entraîne une augmentation de la résistance à la circulation des courants de Foucault.
- Si la perméabilité relative est supérieure à l'unité la composante réactive du capteur se trouve amplifiée et le diagramme se décale vers le haut.
- Une diminution du facteur de remplissage entraîne une diminution du rayon d'un demi cercle.

Dans certaines conditions, il est avantageux de travailler à des endroits précis du diagramme d'impédance, cela est possible en choisissant les paramètres appropriés pour le contrôle [14].

2. 5 Caractéristiques des courants de Foucault

Les Courants de Foucault sont des boucles fermées de courants induits circulant, dans le cas d'un matériau ferromagnétique dans des plans perpendiculaire en flux magnétique, leur circulation est limitée au rayon du champ magnétique induit.

Pour un matériau donné (σ et μ_t constante), la profondeur de pénétration diminue avec l'augmentation de la fréquence. La densité des courants de Foucault devient plus forte près de la surface pour des valeurs importantes de fréquence, leur déphasage aussi varie en fonction de la fréquence. On a alors un retard plus important des courants de Foucault en profondeur par rapport à ceux de la surface en fonction de la fréquence.

2. 5. 1. Choix de la fréquence [18]

- *1^{er} Facteur : pénétration des Courant de Foucault*

Si l'on s'intéresse à des phénomènes profonds il faut utiliser une fréquence basse pour obtenir des courants de Foucault induits dans la zone à mesurer. Inversement une fréquence élevée devra être choisie dans le cas d'une mesure proche de la surface. Par exemple, on utilise une fréquence de quelques Hertz pour des tris des nuances, et de quelques Kilohertz pour les recherches des défauts.

- *2^{eme} Facteur : la grandeur à mesurer*

Pour une mesure de conductivité, si l'on désire que la mesure soit indépendante des variations d'entrefer (distance entre la bobine sonde et le matériau), il faut que les courbes de variation d'impédance en fonction de conductivité électrique σ et l'entrefer soit à peu près perpendiculaire. Pour permettre une séparation de ces paramètres, il faut de ce fait utiliser une fréquence élevée.

2. 5. 2. Mesure d'épaisseur

Dans le cas d'un revêtement ou d'une couche développée par traitement thermique ou thermochimique, la technique de courant de Foucault convienne à la mesure des matériaux conducteurs.

Cette mesure est basée sur les différences des propriétés physiques, en l'occurrence les variations de conductivité entre le métal de base et la couche à mesurer. Dans le cas des

couches obtenues par traitement thermique et thermochimique, la précision est plus grande lorsque les couches sont bien distinctes.

2. 6. Influence du dimensionnement de la pièce sur les courants de Foucault [13] [14]

2. 6. 1. Effet de surface

L'état de la surface de la pièce à contrôler influe sur le contrôle par les courants de Foucault. Cette influence dépend du point efficace du Lift-off (le facteur de remplissage), la figure 2.5 illustre l'effet de l'état de surface sur la mesure.

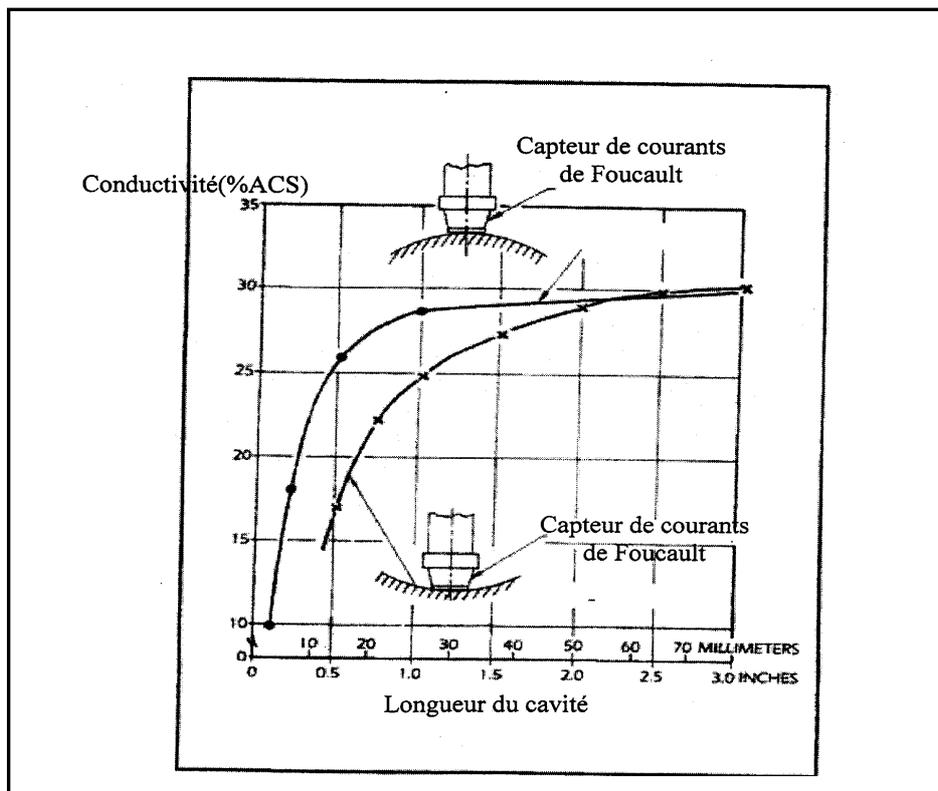


Figure 2.5 : Variation de conductivité en fonction de l'état de surface. [13].

Dans le cas idéal, et afin d'éviter cette influence, il faudrait avoir une surface uniforme, plate et utiliser des supports pour que la sonde soit perpendiculaire.

2. 6. 2. Effet du bord

L'effet de bord peut être mis en évidence en déplaçant le capteur vers le bord de la pièce, on observe alors un changement de résultat de la mesure.

L'emplacement de la sonde, par rapport au bord de la pièce a une influence sur le contrôle. La figure 2.6 montre l'influence de ce paramètre sur la zone de contrôle, ce qui

fausse les résultats. Pour éviter toute perturbation, nous devons travailler à une distance de 5mm comme montre la figure 2.6. Au-delà de l'extrémité de la pièce, afin d'éviter ce phénomène, la sonde doit être focalisée et éloignée du bord de la pièce d'une distance bien déterminée [16].

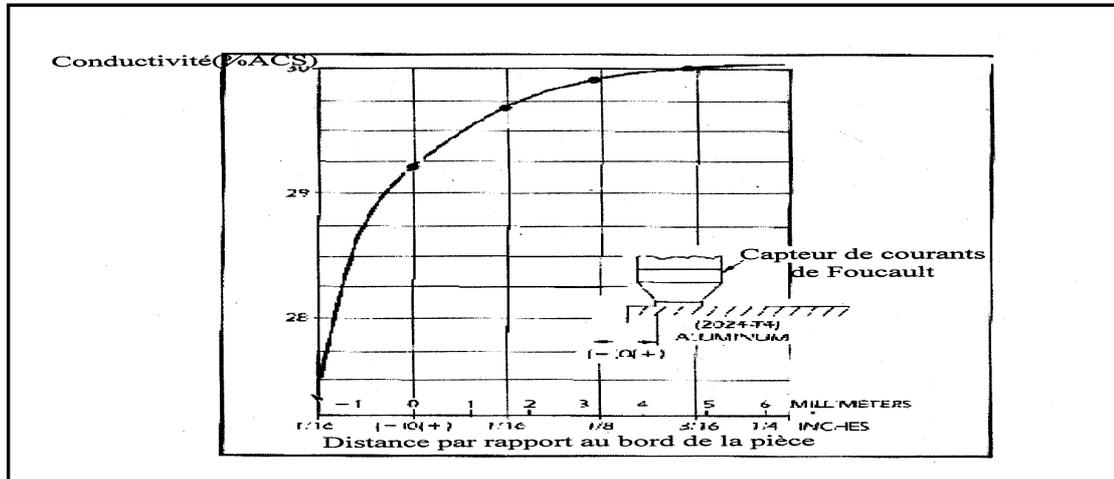


Figure 2.6: variation de la conductivité de la pièce [13]

2. 6. 3. Effet de l'épaisseur sur les courants de Foucault

En général, nous nous intéressons à la détection des défauts ou à la caractérisation des matériaux, mais avec une condition sur l'épaisseur qui dépend du matériau et de la fréquence de travail. La figure 2.7 montre la distance de pénétration des courants de Foucault en fonction des paramètres électriques et magnétiques du matériau conducteur [11] [13].

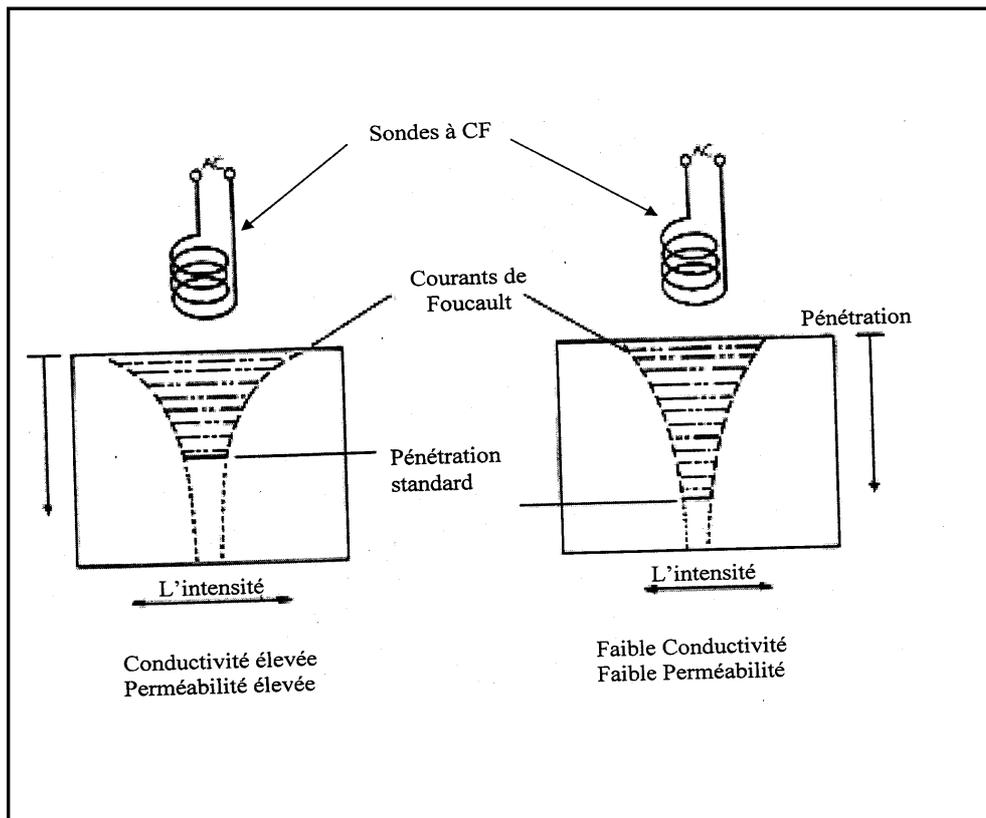


Figure 2.7 : pénétration des Courant de Foucault en fonction des paramètres électromagnétiques [13]

La réponse aux courants de Foucault dépend de la trajectoire de ces courants, plus l'épaisseur de l'échantillon augmente, plus la réponse est importante.

La variation de conductivité en fonction de l'épaisseur est montrée à la figure (2.8) la conductivité devient stable seulement quand l'épaisseur est supérieure à 3δ . Dans ce cas l'épaisseur n'influe pas sur la mesure [11].

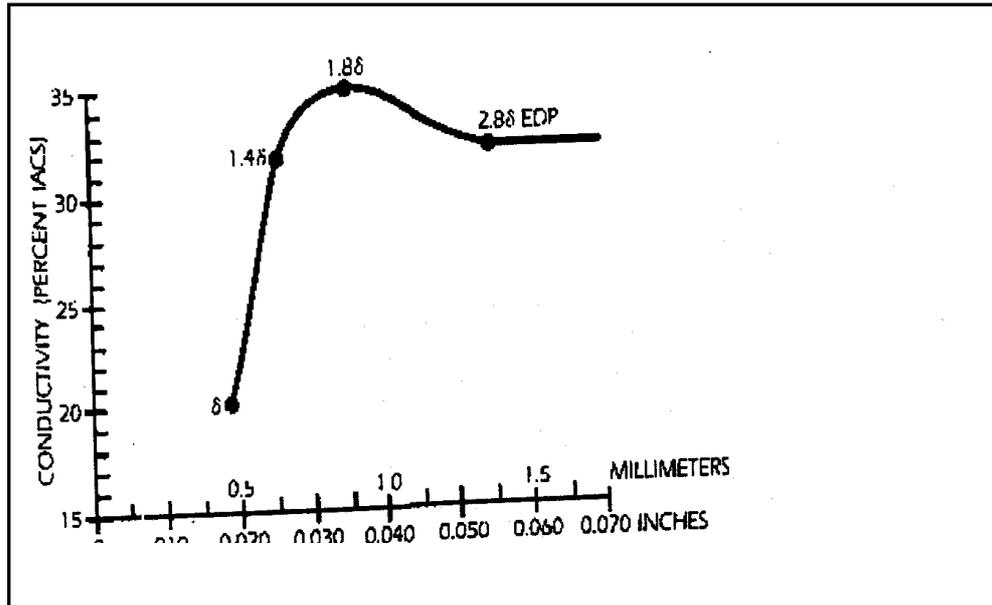


Figure 2.8 : variation du conductivité en fonction du pénétration [13]

L'épaisseur peut fausser les résultats sur le tri des matériaux, un matériau ayant une grande conductivité peut s'identifier comme un matériau de faible conductivité, et cela en ne tenant pas compte de l'influence d'épaisseur.

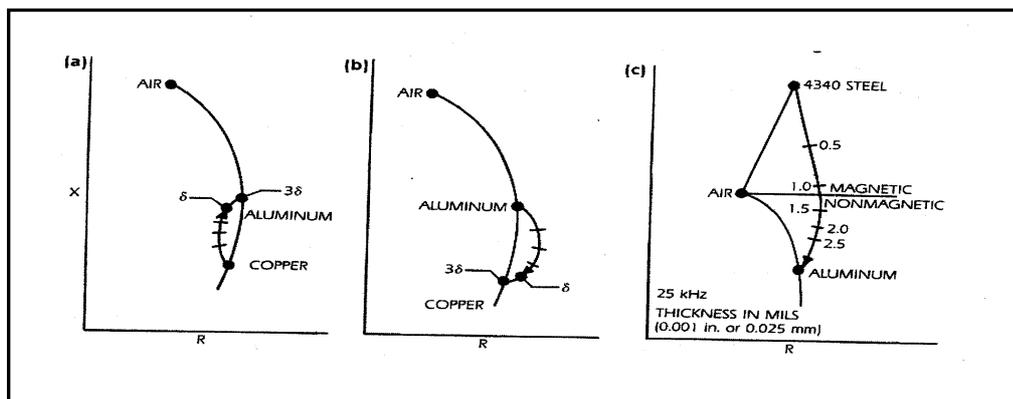


Figure 2.9: Comportement des courants de Foucault avec la variation d'épaisseur [13].

La figure 2.9 montre le comportement de l'impédance de sonde pour des pièces ferromagnétiques en fonction de la profondeur de pénétration (épaisseur de la pièce à contrôler) .

2. 7. Leurs avantages et inconvénients :

Les avantages des courants de Foucault tiennent à leur facilité de mise en œuvre et la rapidité possible de contrôle ou de mesure, l'information à obtenir peut être extraite soit de l'amplitude, soit de la phase du signal qui peut faire l'objet de tout traitement informatique actuel associées aux appareils. Les bancs de mesure peuvent être robotisés pour obtenir des précisions de mesure de l'ordre de 1%.

Par contre, il est nécessaire de préparer très soigneusement le banc de mesure pour n'extraire que le seul signal utile parmi les signaux dus à des nombreux paramètres susceptibles d'intervenir sur la qualité de l'information [15].

Chapitre 3

Contrôle non destructif par ultrasons

3.1. Introduction

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques. Elles se propagent à l'intérieur du matériau avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde. Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courantes vont de quelques centaines de kilohertz à quelques mégahertz.

Ces ondes par un passage au sein du matériau, véhiculent à leur retour une multitude d'informations cumulées dans le signal enregistré.

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts recherchés sur la propagation des ondes vibratoires dans la nature [19] [20].

3.2. Les différents types d'ondes

En étudiant la propagation des ondes élastiques dans les solides, on se trouve conforter à une grande variété d'ondes suivant les conditions de propagation. On parle d'onde de Rayleigh, de Bleustein Gulayev, de Lamb et de bien d'autres types d'ondes, mais celles-ci ne sont en effet que des combinaisons de deux types d'ondes fondamentales qui sont :

- Les ondes longitudinales ou de compression: qui se caractérisent par un déplacement des particules parallèles à la direction de propagation, entraînant un changement de volume dans la région où elles se propagent.

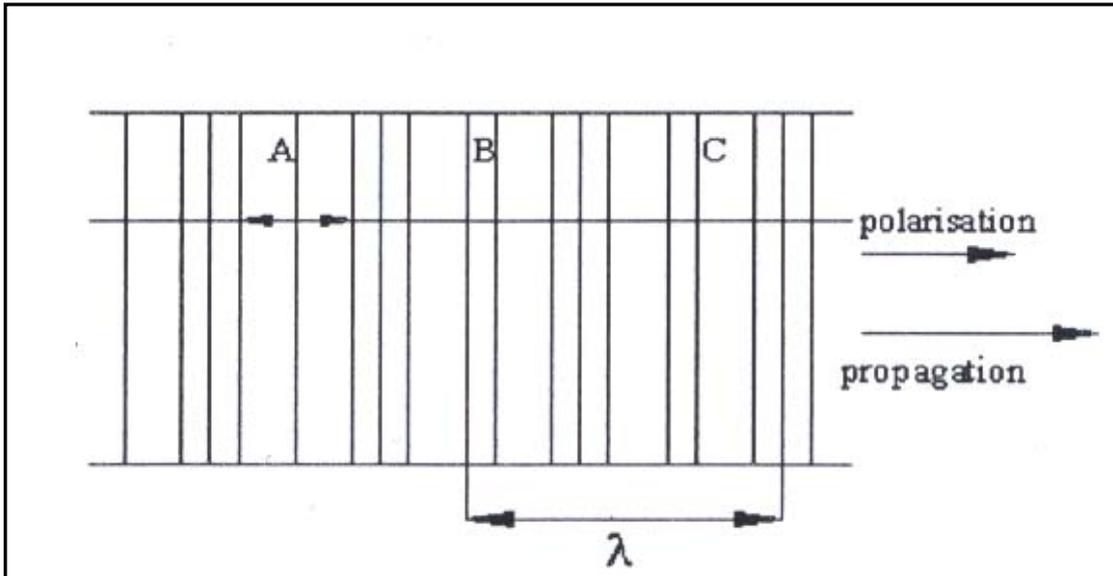


Figure 3.1 : Onde longitudinale [19].

- Les ondes transversales ou de cisaillement : caractérisées par un déplacement des particules perpendiculairement la direction de propagation. Comme la montre la figure 3.2 ces ondes se propagent dans les solides sans changement de volume.

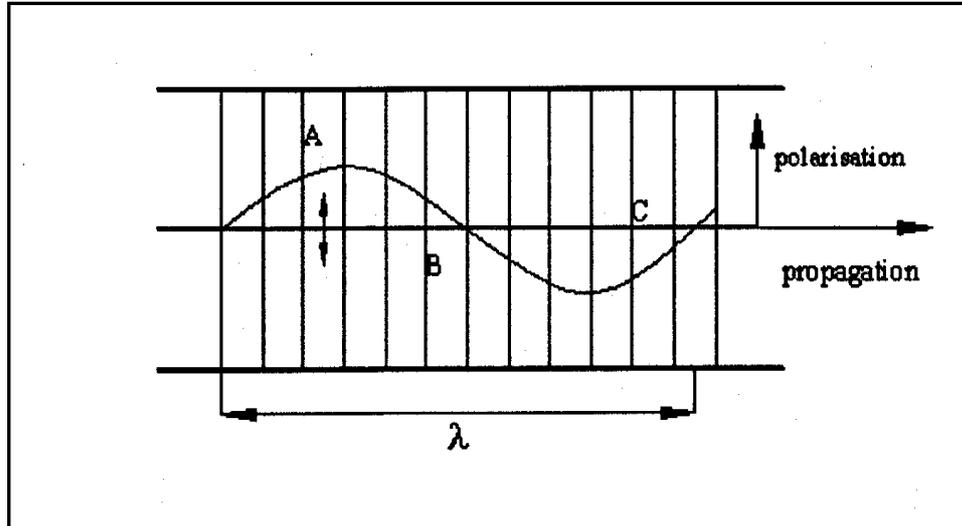


Figure.3.2 Onde transversale [19].

3.3. Impédance acoustique

L'impédance acoustique est définie par analogie entre la propagation d'une onde plane dans un milieu isotrope et une ligne de transmission électrique. L'impédance acoustique « Z », d'une onde plane, dans un milieu isotrope est la valeur absolue de la contrainte sur la vitesse vibration des particules.

➤ Pour une onde longitudinale :

$$z = \frac{\lambda + 2\mu}{V_L} \quad \text{Avec } V_L = \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

➤ Pour une onde transversale :

$$Z = \frac{\mu}{V_t} = \rho V_t \quad \text{Avec } V_t = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

μ, λ Coefficient de LAME.

ρ : Densité du milieu.

V_t : Vitesse transversale.

V_L : Vitesse longitudinale.

Quelques notions relatives aux phénomènes de réflexion et de réfraction des ondes acoustiques sur une frontière séparant deux milieux différents seront données dans ce chapitre car notre expérimentation consiste en la prise de mesure de certaines grandeurs ultrasonores (amplitudes réfléchis, temps de signal rétro diffusés).

3-3-1 Réflexion et transmission sous incidence normales

Considérons une onde acoustique progressive rencontrant la surface de séparation de deux milieux matériels différents sous incidence normale comme cela est schématisé à la Figure 3.3.

Elle va donner naissance à une onde réfléchiée et à une onde transmise qui sera de même nature que l'onde incidente (longitudinale ou transversale).

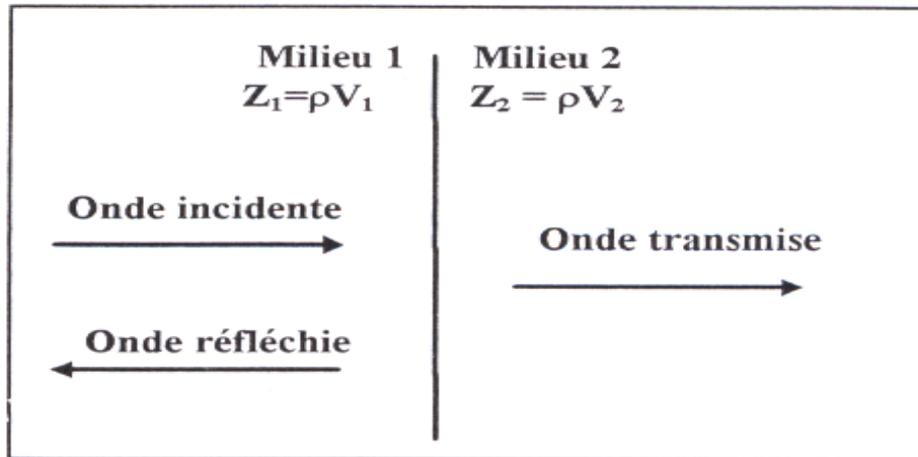


Figure 3.3: Propagation d'une onde ultrasonore plane normalement à la surface de séparation de deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 .

3.3.1.1. Coefficient de réflexion et de transmission à incidence normale

Dans le cas simple où l'onde ultrasonore émise est une onde plane où sa direction de propagation est normale à l'interface, il est possible de calculer la fraction de l'onde qui est transmise. On définit deux coefficients :

➤ Le coefficient de réflexion $R = \frac{P_r}{P_i}$ rapport de la pression ultrasonore réfléchiée à la pression ultrasonore incidente.

➤ Le coefficient de transmission $T = \frac{P_t}{P_i}$ rapport de la pression ultrasonore de transmission à la pression ultrasonore incidente.

Ces deux coefficients R et T peuvent être calculés à partir d'une grandeur propre aux matériaux et qui est l'impédance acoustique Z qui caractérise la qualité des matériaux à transmettre les ondes ultrasonores

➤ Le coefficient de réflexion R se détermine par $R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$.

➤ Le coefficient de transmission T se détermine par $T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$.

Z_1 : impédance acoustique du milieu d'incidence

Z_2 : impédance acoustique du milieu de transmission.

La transmission d'une onde ultrasonore se fera d'autant mieux que les deux milieux auront une impédance acoustique voisine.

L'énergie E de l'onde ultrasonore par unité de surface et par unité de temps est définie par :

$$E = 1/2 \cdot P^2/Z \text{ et on peut montrer que : } E_{\text{incidente}} = E_{\text{réfléchie}} + E_{\text{transmise}}.$$

Dans certains cas, la valeur du coefficient de réflexion peut être négative, cela indique simplement que l'onde incidente et l'onde réfléchie sont en opposition de phase [21] [22].

3. 3. 2. Réflexion et transmission sous incidence oblique phénomène de conversion de mode

Lorsque une onde plane rencontre la surface de séparation de deux milieux d'impédance différents sous incidence oblique, il se produit des conversions de mode. L'onde acoustique incidente est alors réfléchie et réfractée sous plusieurs angles, avec changement de sa polarisation.

Le problème se résout comme celui de l'incidence normale, en écrivant les équations de continuité des elongations et des pressions sur la surface de séparation, d'où l'on déduit les loi de Snell-Descartes [22].

Si l'on parle de l'onde incidente longitudinale dans le milieu 1 (vitesse V_{L1}) à l'incidente θ_i , celui-ci est réfléchi sous le même angle θ_{r1} , mais elle donne lieu également à une onde transversale réfléchie dans le milieu 2 (vitesse V_{t1}) sous l'angle θ_{r2} et deux ondes réfractées dans le milieu 2, d'une longitudinale et d'autre transversale de vitesse V_{L2} et V_{T2} , sous des angles θ_{T1} et θ_{T2} respectivement comme le montre schématiquement la figure 3.4.

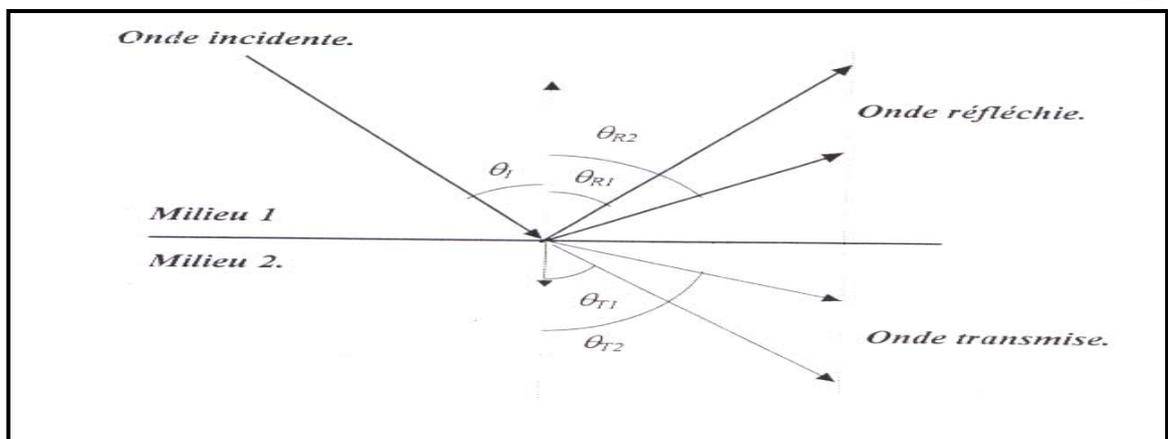


Figure 3.4: Double réflexion et réfraction des l'ultrasons à la frontière entre deux milieux, avec conversion de mode [22].

- Les lois de Snell-Descartes s'expriment ainsi

$$\sin \theta_{T1} / V_{L1} = \sin \theta_{T2} / V_{L2} = \sin \theta_{R1} / V_{T1} = \sin \theta_{R2} / V_{T2}.$$

Considérons le cas où le milieu (1) est liquide et le milieu (2) est solide, comme les vitesses acoustiques dans les solides sont supérieures à celles correspondantes aux liquides, les faisceaux acoustiques réfractés vont s'écarter de la normale (contrairement à ce qui se passerait en optique où la vitesse des ondes lumineuses est en général plus faible dans les solides que dans les liquides), au dessus d'une certaine valeur critique θ_{IC1} de θ_1 tel que $\theta_{T1} = 90^\circ$.

D'après la loi de Snell-Descartes, il n'y a plus d'onde acoustique longitudinale réfractée, toute l'énergie réfractée est transmise sous forme d'ondes transversales qui est déduite de l'expression :

$$\sin \theta_{IC1} = V_{L1} / V_{L2},$$

Il existe une autre angle $\theta_{IC2} > \theta_{IC1}$ pour les ondes longitudinales incidentes, correspondant à $\theta_{T2} = 90^\circ$ au delà duquel il n'y a plus d'énergie acoustique transmise sous forme ni d'ondes longitudinales, ni d'ondes transversales :

$$\sin \theta_{IC2} = V_{L1} / V_{L2}$$

Pour un angle θ_{IS} légèrement supérieur à θ_{IC1} , tel que : $\sin \theta_{IS} = V_{L1} / V_S$.

L'énergie acoustique est transmise sous forme d'onde acoustique de surface de vitesse V_S qui se propagent parallèlement à l'interface ; V_S étant toujours inférieur à V_{T2} .

Ainsi en ce qui concerne la propagation d'une onde acoustique entre l'eau et l'acier les valeurs correspondantes à θ_{IC1} et θ_{IC2} sont respectivement $14,5^\circ$ et $27,5^\circ$ appelés premier et deuxième angle critique alors que θ_S est à 30° .

- On peut donc, à partir d'ondes longitudinales, produire simplement des ondes transversales et des ondes de surface dans un solide [22].

3.3.3. Rétrodiffusion

Récemment un nouveau phénomène acoustique a été observé. Celui-ci est la rétrodiffusion d'un faisceau ultrasonore à partir d'une interface liquide solide.

Le faisceau incident qui est généré dans l'eau par une sonde acoustique, arrive sur une interface liquide/ solide où une partie est réfléchi dans l'eau et l'autre est transmise dans le solide comme montre la figure 3.5.

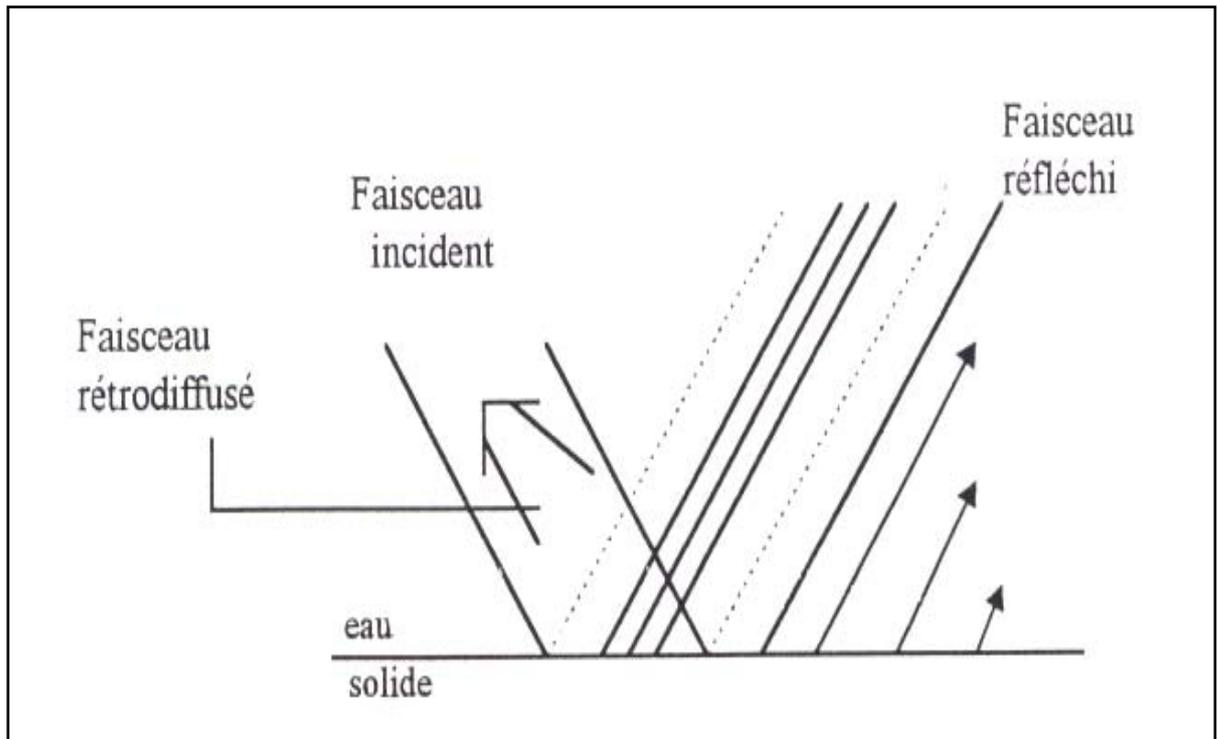


Figure 3.5: illustration schématique d'une expérience montrant en évidence le phénomène de rétrodiffusion [23].

Quand l'angle d'incidence est égale à l'angle de Rayleigh (θ_{1S}) cela produit un phénomène appelé déplacement de Schock. [23]

Ce phénomène se traduit par le déplacement latéral du faisceau réfléchi comme montre la figure 3.6.

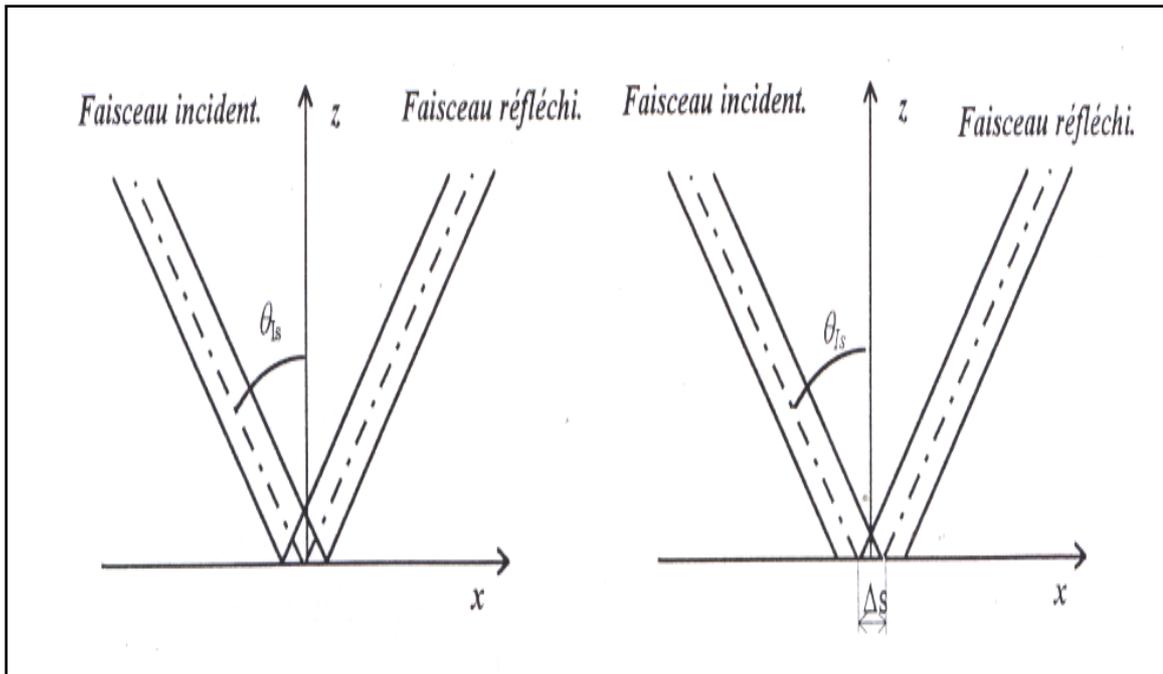


Figure 3.6: Déplacement latéral du faisceau réfléchi. [23]

Des expérimentateurs en étudiant ce phénomène (déplacement du faisceau réfléchi) ont observé qu'une quantité considérable d'énergie est émise à partir de l'interface, dans la direction de l'incidence.

Ceci a provoqué une confusion quant à la dépendance de la rétrodiffusion de l'angle d'incidence. Ce n'est que plus tard qu'il a été pratiquement démontré que cette dépendance n'existait pas et que seulement l'énergie émise sera observée près de l'angle critique qui sera aussi appelé angle de l'onde friyante [21].

3. 3. 4. Atténuation des ondes ultrasonores dans les solides

En considérant les matériaux comme des milieux idéaux, la pression acoustique des ondes qui s'y propagent n'est atténuée que par la nature dispersive de ces ondes, une onde plane ne s'atténuera pas le long de son parcours, quelque soit sa pression.

- Les matériaux naturels ont une résistance à la propagation des ondes ultrasonores, plus ou moins prononcé ce qui affaibli d'avantage ces dernières. Ceci est le résultat de deux phénomènes, qui sont « la diffusion » et « l'absorption », tout deux se regroupant dans le concept de l'atténuation.

3.4.3.1 Diffusion

- La diffusion se résulte du fait que le matériau n'est pas tout à fait homogène, il contient des frontières séparant des milieux des différentes densités aux vitesses acoustiques, au niveau duquel l'indépendance acoustique est brusquement modifiée.

De telles hétérogénéités peuvent être des inclusions gazeuses ou métalliques. Aussi, il existe des matériaux qui sont hétérogènes de par leur nature, telle que la fonte. les aciers et les laitons par exemple.

Le matériau peut aussi être homogène pour les ondes ultrasonores si les grains sont orientés au hasard, même s'il y a qu'un seul type de cristaux. Si le cristal en question possède des propriétés élastiques différentes (vitesse acoustique différente) dans les directions différentes, on est alors en présence d'un matériau anisotrope.

En parlant de l'élasticité, les matériaux sont, en règle générale, anisotropes ; mais cette anisotropie est plus ou moins importante d'un métal à un autre.

3. 4. 3. 2. Absorption

L'absorption acoustique par une conversion directe de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur, par l'intermédiaire des différents processus d'interaction entre l'onde acoustique et le solide.

Certains, expliquent le phénomène par la théorie de dislocation, celle-ci démontre que les matériaux présentent une concentration des dislocation aux niveaux des joints de grains, ces derniers produisent un effet plus au moins important lorsque l'épaisseur du joint est de l'ordre de la longueur d'onde [22],[23].

La pression acoustique d'une onde plane qui décroît à cause de l'atténuation, peut être écrite sous forme exponentielle.

$$P = P_0 e^{-\alpha d}$$

P_0 et P sont respectivement les pressions acoustiques initiale et finale, d'une section de longueur d et de coefficient d'atténuation α .

A forte épaisseur, on est souvent obligé de travailler dans le champs lointain, un phénomène additionnel doit être pris en considération, c'est la diminution de l'amplitude due à la divergence du faisceau ultrasonore.

La pression acoustique à une distance « a » de la sonde peut s'écrire :

$$p = p_0 \pi N / a e^{-\alpha d}$$

N = longueur du champ proche.

Généralement les ondes transversales sont beaucoup plus atténuées que les ondes longitudinales, particulièrement dans les matériaux plastiques.

L'atténuation augmente souvent avec la température, particulièrement dans les matériaux plastiques, dans le cas des aciers, un maximum d'atténuation acoustique apparaît au point de transformation du système cubique centré [23].

Chapitre 4

Techniques expérimentales

4.1 Introduction :

Dans cette partie, nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées lors de la réalisation de ce travail. L'interprétation exacte des différents résultats obtenus lors de cette étude repose sur les mesures correctes et justes provenant des instruments techniques utilisés et des limites technologiques de chaque équipement.

Ainsi l'exactitude des résultats d'observation, d'analyse et de calculs effectués sur les échantillons utilisées sont fonctions de la précision des méthodes de caractérisation utilisées.

Dans ce qui suit, nous présentons par ordre chronologique de manipulation les différentes opérations concernant l'élaboration et la caractérisation des échantillons.

4.2. L'élaboration du revêtement

4.2. 1. Choix du substrat

Compte tenu de sa disponibilité dans l'industrie Algérienne, de son utilisation, nous avons utilisé un acier doux dont la composition chimique est donnée par :

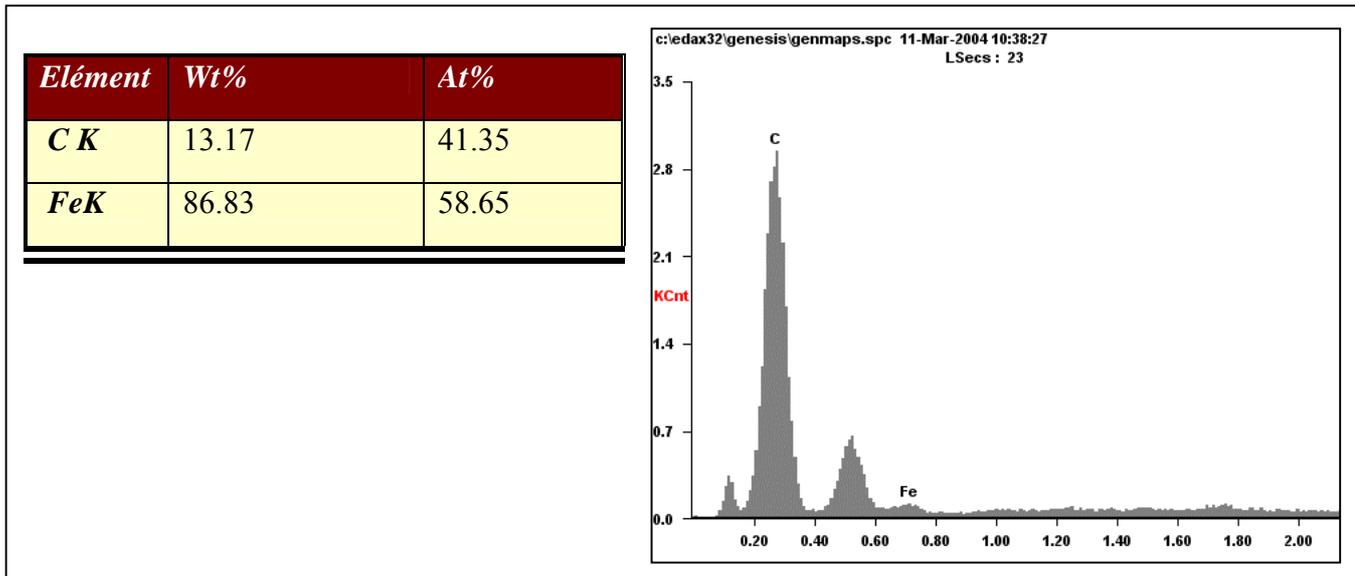


Figure 4.1 Composition chimique du substrat.

- ❖ Les échantillons sont de forme de plaque carrée de dimension de 60 mm de côté.

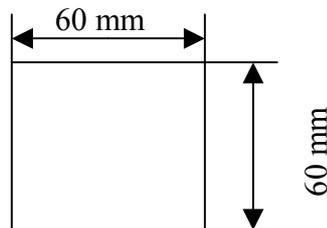


Figure 4.2 Eprouvette pour la déposition.

- ❖ Les autres sont de forme cylindrique de 25 mm de diamètre et d'hauteur 25mm réservés pour effectuer les tests d'arrachement par traction selon la norme ASTM C633-79.

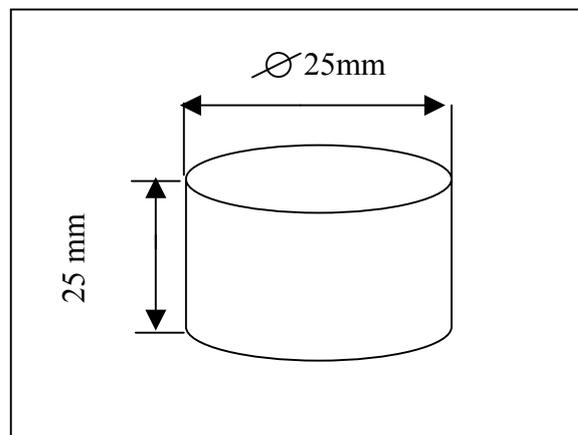


Figure 4.3 Eprouvette de test d'arrachement par traction

4. 2. 2. Choix du revêtement

Comme matériau de dépôt nous avons utilisées deux types de poudres.

- Une poudre métallique à base de Nickel : LUBROTEC 19985.
- Une poudre ULTRABOND 50.000, utilisée comme sous couche d'accrochage

Les caractéristiques de chacune des poudres sont données dans le tableau n° 4.1.

Tableau N° 4.1 Caractéristiques des poudres de projection pour la procède ROTOTE C 80.

Produit	Application ROTOTE C 80	Caractéristiques principales
ULTRABOND 50.000	-déposé sur tous métaux ferreux et alliage d'aluminium -épaisseur de 0,1 à 0,2 mm	-alliage micro pulvérisé à propriété exothermique - le microsodages effectué sans que la température de la pièce revêtue excède 200° C -permet l'accrochage métallurgique ponctuel sur tous les métaux de base à l'exception du Cuivre pur
LUBROTEC 19985	- tous les métaux ferreux, cuivreux et alliage d'aluminium -dépôt à très basse température (celle de pièce $\leq 220^{\circ}\text{C}$) Température du service 530°C	-résistance au frottement métal contre métal et à certaine forme de corrosion -bonne résistance à la pression -facilement usinable à l'outil de coupe -aucune déformation ou changement de structure

4.2.3 Mise en oeuvre de la projection thermique

Avant de procéder à la projection du matériau d'apport sur le substrat, celui-ci doit être préparé avec beaucoup de précaution car c'est une étape déterminante quant à la qualité de l'adhérence du dépôt.

4.2.3.1 préparations de surface à revêtir (dégraissage)

Les échantillons utilisés dans la projection thermique sont dégraissés et nettoyés afin d'éliminer les salissures composées principalement de graisse d'huile et de sueur des mains

4.2.3.2) Paramètres opératoires de la projection thermique:

Afin de mettre en évidence l'effet des paramètres opératoires sur la qualité d'un revêtement nous avons délibérément modifié plusieurs paramètres opératoires, notamment, la distance de tir, la température de préchauffage, la rugosité du substrat et l'emploi de la sous couche d'accrochage.

Tableau n° 4.2 les paramètres opératoires de la projection thermique

N° de l'échantillon	Distance de tir (cm)			Préchauffage	Sous couche d'accrochage	Rugosité
	10	15	20			
Echantillon n°01	+					+
Echantillon n°02		+				+
Echantillon n°03			+			+
Echantillon n°04		+		+		+
Echantillon n°05		+			+	+
Echantillon n°06		+		+	+	+

4.2.3.3 Métallisation

Dans notre cas nous avons utilisé pistolet ROTOTEC 80, de Castollin .Eutectic C'est un pistolet de projection thermique utilisant une flamme oxyacétylénique pour projeter des alliages sous forme de poudre micro pulvérisé. Le débit de poudre se fait par gravité. Ce pistolet peut être utilisé soit manuellement ou installé sur un tour mécanique. Il

ne provoque pas l'échauffement du métal de base et aucun changement microstructural n'intervient sur les pièces traitées. La figure 4.3 montre une coupe schématique de pistolet ROTOTEC 80.

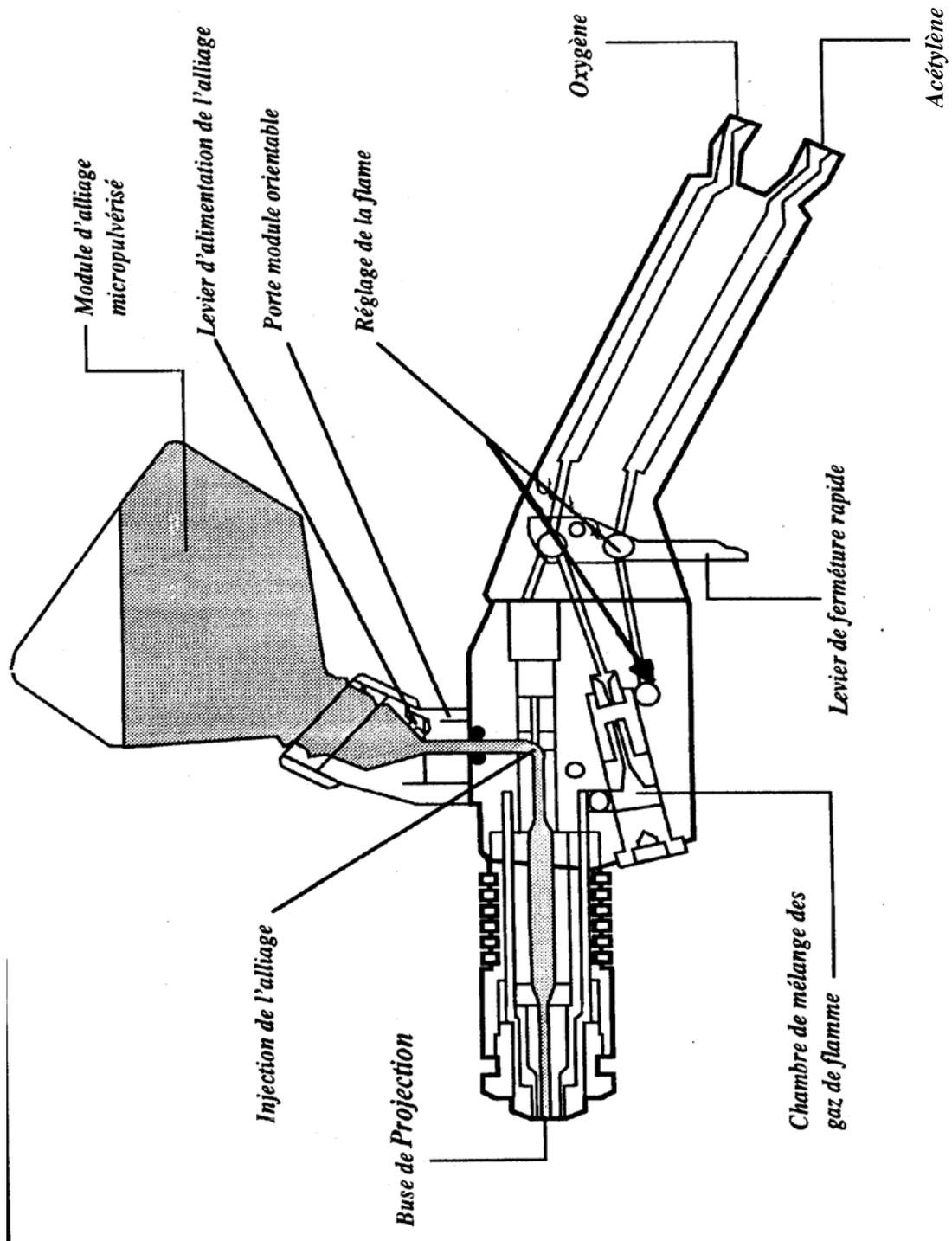


Figure 4.4 Le chalumeau ROTOTEC 80) [2].

-Le pistolet Rototec 80 peut projeter une large gamme de poudres alliées, avec déposition au besoin d'une sous couche d'accrochage, a base NiAl [2].

Le refroidissement des échantillons lors de la projection thermique est indispensable en raison de l'augmentation de la température du substrat qui peut engendrer de problème de stabilité dimensionnelle. En outre, il influence de façon importante sur le taux de contrainte résiduelle à l'intérieur de revêtement, tant au niveau des contraintes de trempe que des contraintes de contraction thermiques pendant la construction du dépôt. Le refroidissement s'effectue par l'utilisation d'un flux d'air comprimé qui contribue aussi à l'évacuation des poussières pendant la projection. [4].

4.3. Caractérisation des revêtements

4.3. 1. Contrôle non destructif par courant de Foucault

Le contrôle par courant de Foucault a été effectué par un appareil FORSTER, le DEFECTOMAT F2. 825. L'institut FORSTER, est l'un des premiers constructeurs d'appareil à courant de Foucault. Le FORSTER 2.825 est un appareil analogique, qui travail avec une gamme de fréquence allant de 100 HZ à 1MHZ.

Par visualisation des signaux, il permet le contrôle des surfaces fissurées, et permettre la mesure des épaisseurs. Il travail en mode absolue et en différentiel. Sur en seule voie. Il ne convient pas pour les chantiers, vu l'importance de son poids et sa grande taille. Il est destiné pour le travail de laboratoire.

On a procédé à un balayage d'une surface de 10 mm × 10 m avec un pas de 10 mm à l'aide d'une sonde ce qui fait un total de 36 points pour un échantillon.

Les résultats obtenus par la machine des courants de Foucault 2. 825 FORSTER. HS avec une fréquence de 15 KHZ et d'un gain de 30 dB.

4.3. 2. Contrôle non destructif par ultrason

Le contrôle non destructif par ultrason a permis d'évaluer l'adhérence du revêtement au substrat. Une chaîne de contrôle a été utilisée pour la réalisation de cet essai.

4.3. 1. Description de la chaîne de contrôle par ultrason

La chaîne de contrôle ultrasonore comme la montre la figure 4.4 se compose de :

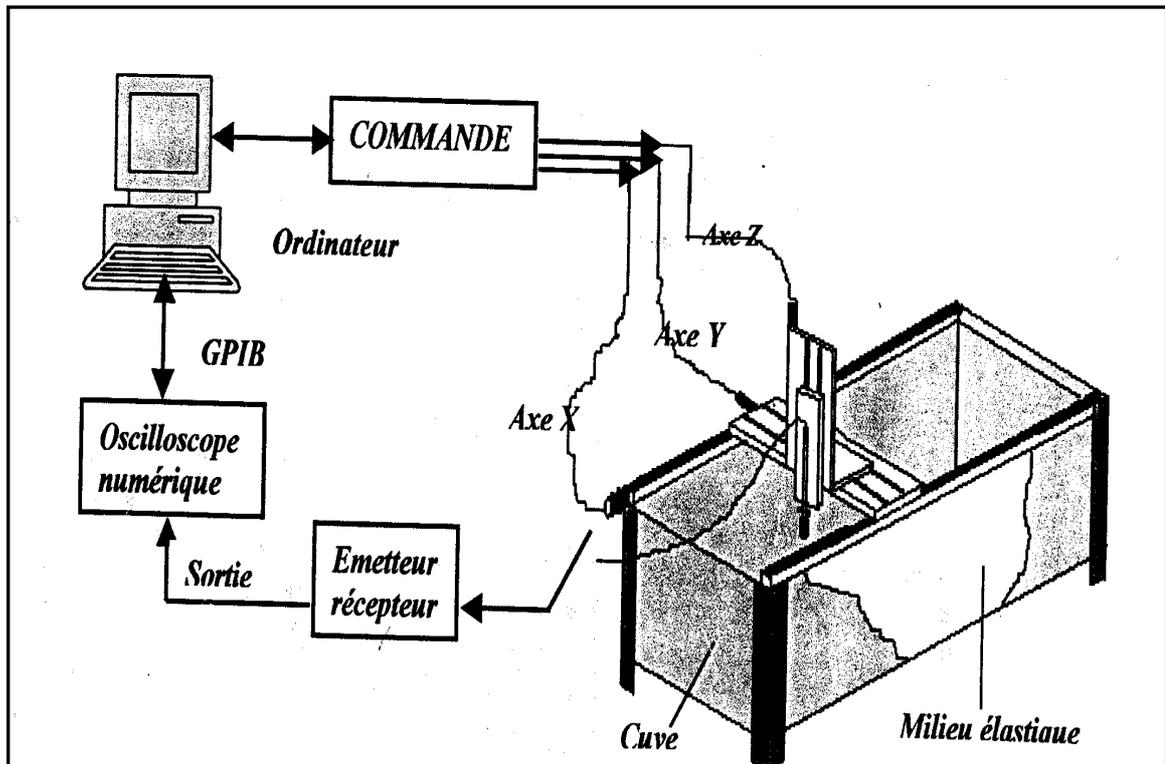


Figure 4.5 chaîne de mesure ultrasonore [21]

- ❖ Un micro-ordinateur qui est doté d'un programme qui permet la commande des trois moteurs pas à pas de la cuve ultrasonore suivant trois axes, x, y, z, ainsi que le traitement des données et l'affichage des résultats.
- ❖ un générateur d'impulsion électrique (émetteur- récepteur) produit à une cadence réglable des impulsions d'amplitudes élevées.
- ❖ Un oscilloscope à phosphore numérique de type TEKTRONIX série TDS 3054 connecté au micro-ordinateur via une interface IEEE 488 qui permet l'échantillonnage et l'acquisition des signaux obtenus.
- ❖ Un pupitre de commande de la cuve de type SIGE AX 416 PP qui est connecté au micro-ordinateur. Il permet la commande automatique et manuelle de chariot porte sonde suivant les trois axes.
- ❖ La cuve utilisée spécialement pour le contrôle par immersion de petites pièces plates et cylindriques, est montrée à la figure 4.5. Elle est équipée de trois chariots qui se déplacent suivant trois axes x, y, z. Deux supports de la sonde sont fixées sur le troisième chariot que l'on peut régler à l'aide de deux pignons:

l'un pour l'orientation verticale et l'autre pour l'orientation transversale. Cette cuve permet en tout cinq degrés de liberté.

Les deux sondes sont utilisées simultanément dans le cas de contrôle par transmission (émetteur, récepteur) séparés dont l'une envoie l'onde et l'autre reçoit. Mais dans notre étude (contrôle par Echo) on utilise une seule sonde (même sonde qui envoie et reçoit l'onde).

La tige qui maintient la pièce à étudier est fixée sur goniomètre. Ce dernier est fixé sur un bac en plexiglas.

Pour faciliter la propagation des ondes ultrasonores on a utilisé un milieu élastique qui est l'eau douce dans lequel la pièce et la sonde sont immergées.

Le bac en plexiglas est placé dans la cuve à immersion, et repose sur deux cales de hauteur identique.

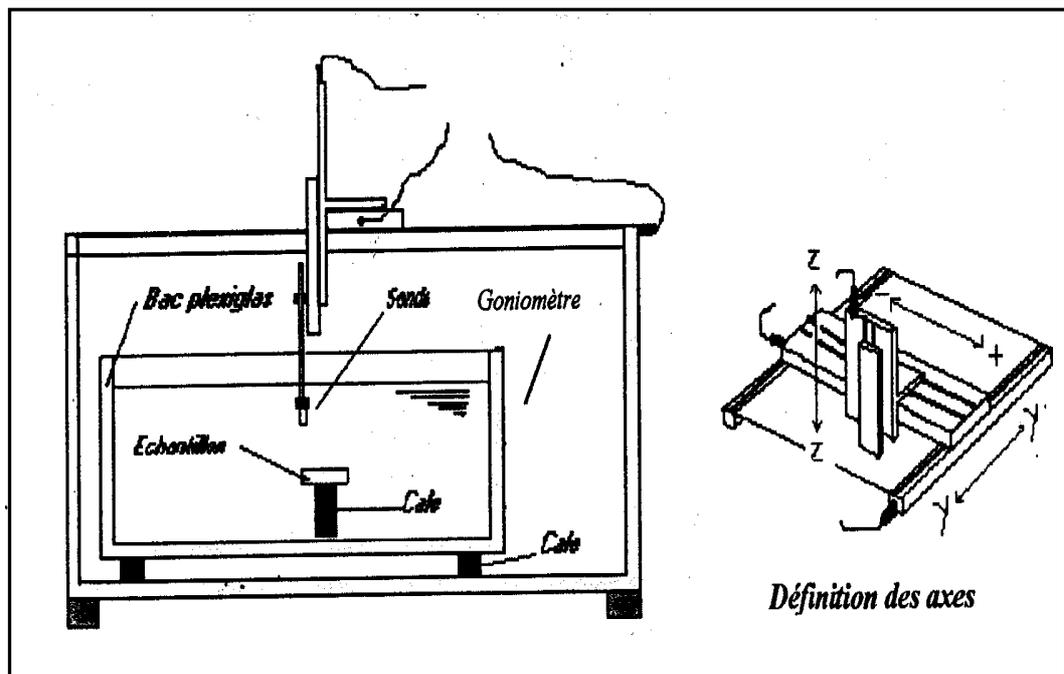


Figure 4.6 Illustration de la cuve [21].

4.4 Test d'arrachement:

Le test d'arrachement par traction se base sur des éprouvettes de forme cylindrique de diamètre et hauteur égale à 25mm selon la norme ASTM C 633-79. Ce test consiste à revêtir un cylindre et le coller à une deuxième cylindre dans le sens longitudinal. Le tout est placé dans un four à 60° C durant deux heures pour que la colle soit

complètement polymérisée. Pour une polymérisation à la température ambiante il faut atteindre 24 heures une coupe schématique des deux cylindres est montrée à la figure 4.7

L'appareil utilisé pour réaliser l'arrachement est une machine de traction universelle de marque MTS. Cette machine est reliée à un PC qui permet l'affichage des résultats et le traçage de la courbe de traction.

Trois cas de figures peuvent se présenter durant l'essai de traction comme c'est illustré à la figure 4.8.

La contrainte d'arrachement du revêtement sera calculée uniquement dans le cas (2) et (3) et cela d'après la simple relation

$$\sigma = F/S.$$

Avec

σ = Contrainte d'adhésion (N/mm²)

F = Charge de rupture (N)

S = Surface de l'éprouvette (mm²)

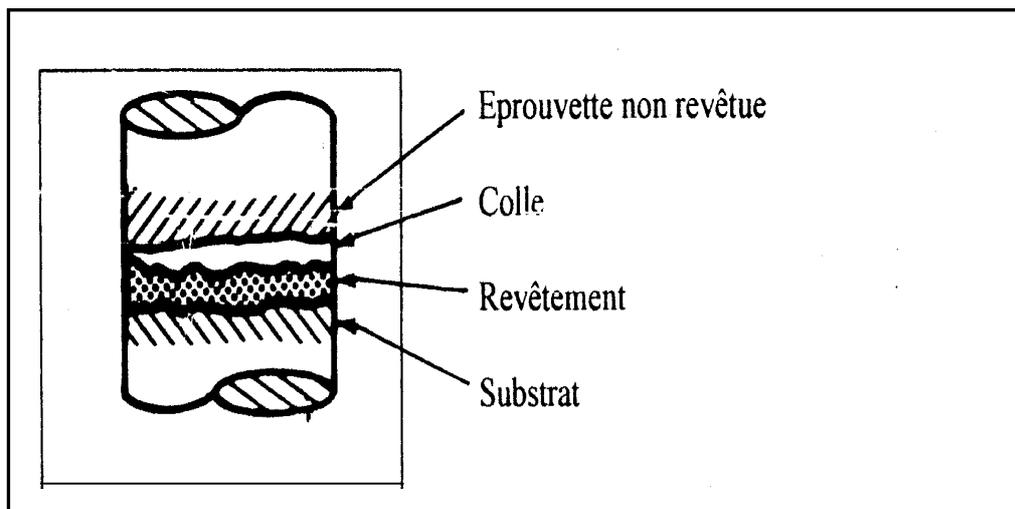


Figure 4.7 Eprouvette De test d'arrachement selon la norme ASTM C 633-79.

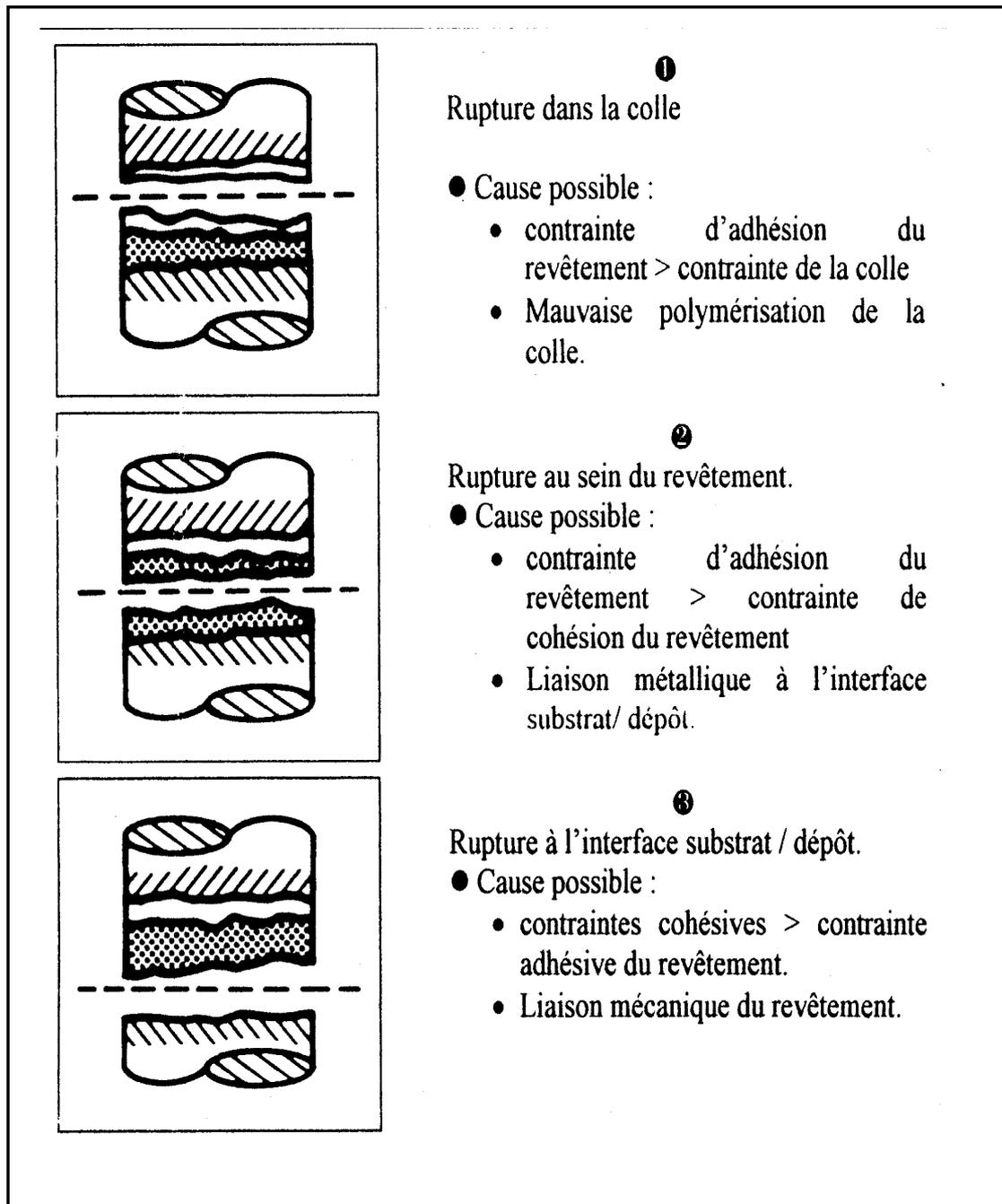


Figure 4.8 Différents cas possibles lors de test d'arrachement par traction.

4.5. Microscope électronique à balayage

Les échantillons découpés dans le sens transversal sont examinés par un microscope électronique à balayage de type JEOL. JSM. 5800 L4. L'échantillon est d'abord placé sous vide primaire, il est ensuite attaqué par un faisceau d'électrons soumis à une tension variable, toutes les variations en microscope électronique repose sur une cible de matière (échantillon à étudier) lors de cette interaction (électron, matière).

Chapitre 5

Résultats et Interprétations.

5.1. Caractérisation chimique et microstructurale

LE LUBROTEC 19985

LE LUBROTEC 19985 est un alliage métallique à base de nickel très utilisé dans les applications où la résistance au frottement métal contre métal et à certaines formes de corrosion s'avèrent insuffisante. La température de service pour ce type d'alliage est de 550° C.

La projection thermique de la poudre agglomérée et frittée figure (5.1) a permis la construction de revêtement lamellaire typique de couches superposées.

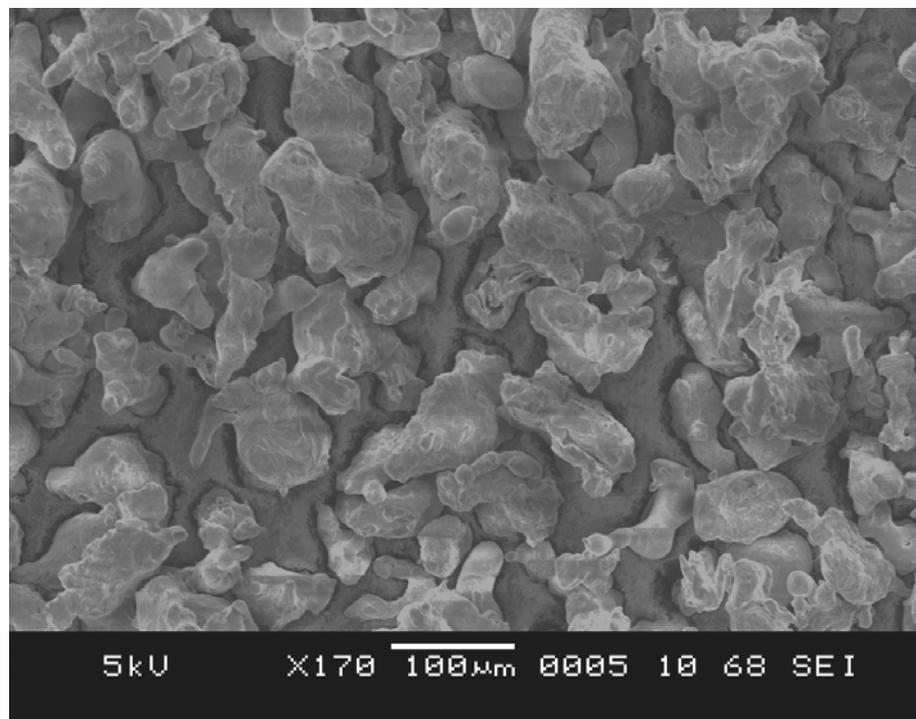


Figure 5.1 Photo MEB de la poudre LUBROTEC 19985

La composition chimique de la poudre LUBROTEC 19985 est donnée à la figure 5.2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.32	12.94
<i>OK</i>	02.18	06.37
<i>AlK</i>	07.29	12.62
<i>SiK</i>	00.78	01.31
<i>MoL</i>	06.78	03.30
<i>CrK</i>	00.47	00.42
<i>FeK</i>	00.51	00.43
<i>NiK</i>	78.67	62.62

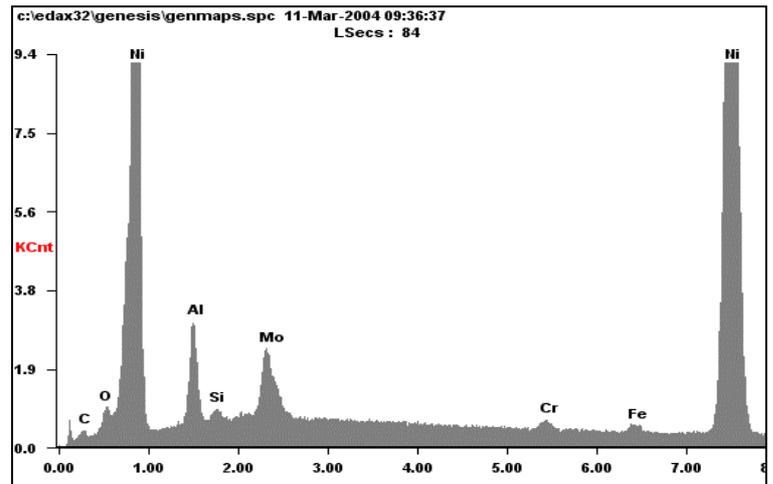


Figure 5.2 la composition chimique de la poudre LUBROTEC 19985

ULTRABOND 50000 :

ULTRABOND 50000 Fait partie de la famille des poudres qui servent comme sous couches d'accrochage afin d'améliorer l'adhérence des dépôts au substrat. L'observation par microscope électronique à balayage est montrée à la figure (5.3) révèle la présence d'un mélange des particules de forme aléatoire de même composition chimique comme le confirme l'analyse au diffraction aux rayons X (SDE) de la figure (5.4) .

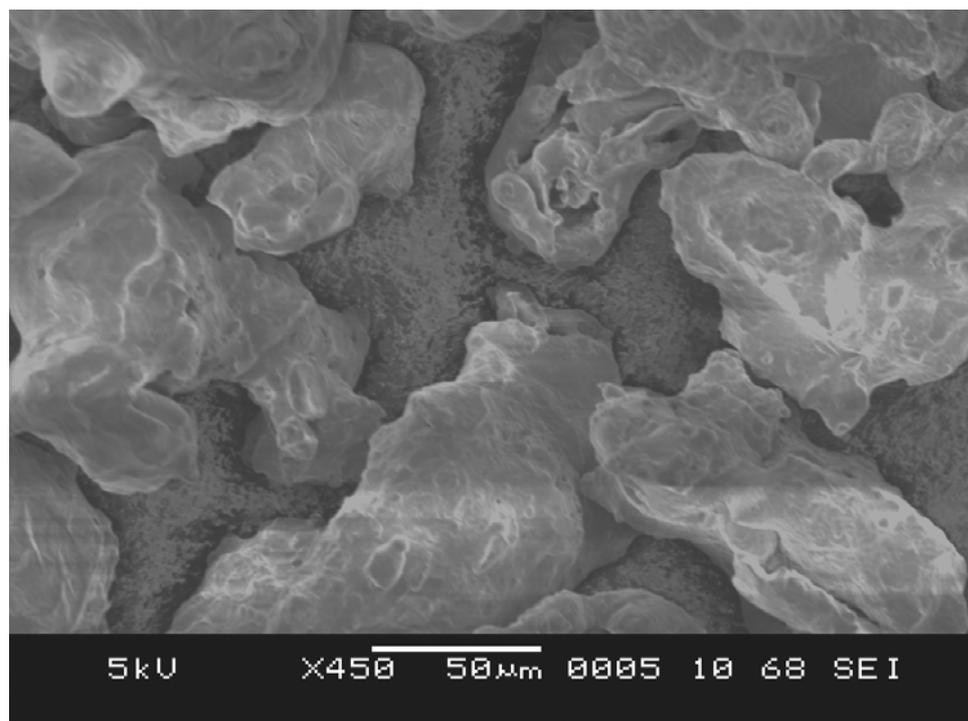


Figure 5.3 Photo MEB de la poudre ULTRABOND 50000.

L'analyse par spectroscopie dispersive en énergie (SDE) donne la composition chimique suivante :

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	05.23	16.06
<i>SiK</i>	02.67	04.67
<i>CrK</i>	16.64	15.73
<i>FeK</i>	08.23	07.25
<i>NiK</i>	67.24	56.30

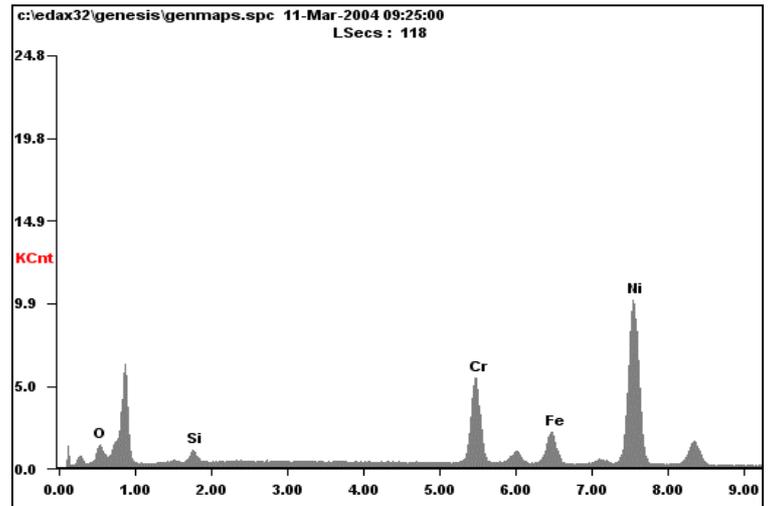


Figure 5.4 : Composition chimique de la poudre ULTRABOND 50000

L'observation de la section transversale du revêtement montre une structure typique de couches superposées qui résulte des oxydes formés entre les lamelles, indiquant une oxydation durant le vol des particules fondues, figure (5.5). Ces oxydes se traduisent par des porosités dans le revêtement.

Sur la même figure nous remarquons la présence d'un petit nombre de particules infondues.

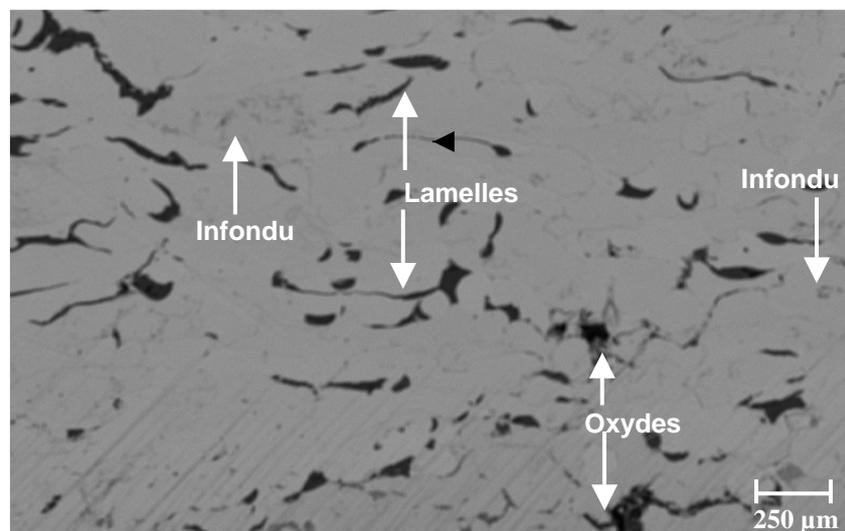


Figure 5.5 Section transversale du revêtement LUBROTEC 19985.

Les échantillons

Pour l'échantillon n°1 déposé avec une distance de tir égale 10 cm, on remarque que l'état de surface du revêtement n'est pas uniforme parce que le temps de séjour des particules est réduit (distance de tir est 10cm). En effet un excès de l'énergie thermique et cinétique se produit, des particules solides du matériau d'apport rebondit sur le substrat et diminue considérablement le rendement de la projection thermique.

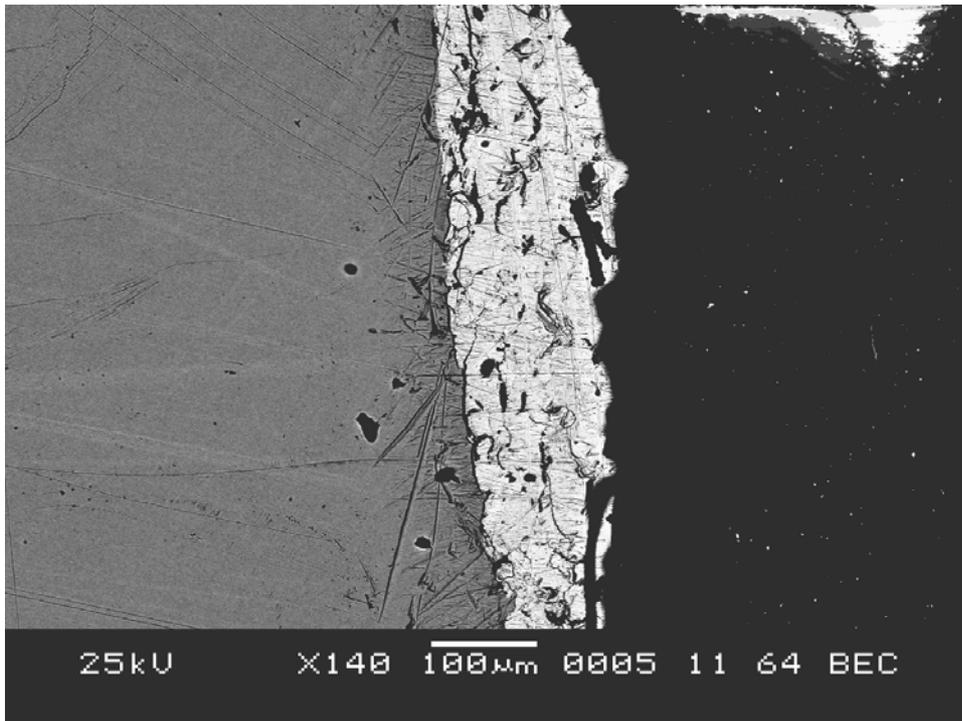


Figure5.6 Section transversale de l'échantillon N° 01.

Pour l'échantillon n°2 ou la distance de tir est égale à 15 cm nous remarquons que l'état de surface est bonne et nous avons un bon écrasement des particules, cela est due à la bonne répartition entre l'énergie cinétique et énergie thermique.

Aussi nous remarquons la faible porosité dans le revêtement

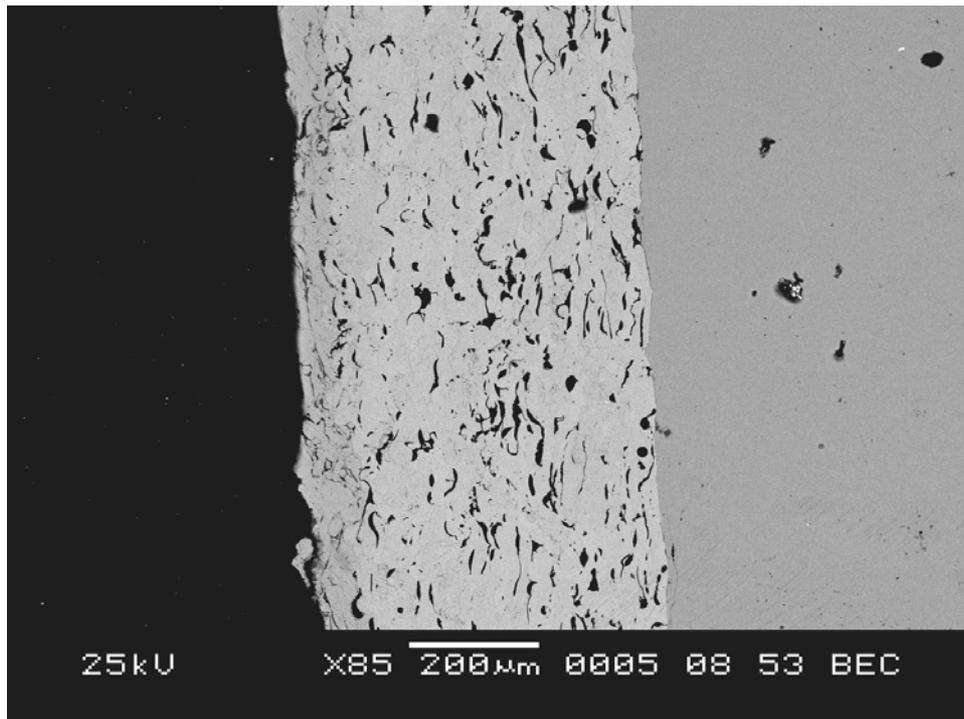


Figure 5.7 Section transversale de l'échantillon N° 02.

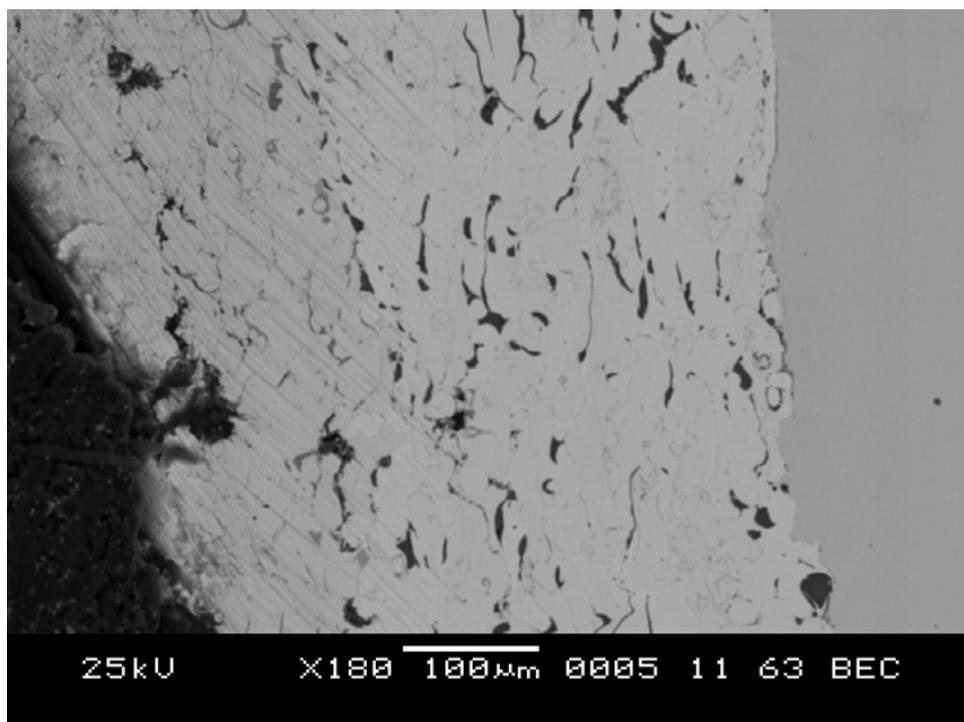


Figure 5.8 Section transversale de l'échantillon N° 03.

Dans le cas où la distance de tir est égale à 20 cm (l'échantillon n° 3) on observe la présence d'une porosité importante dans le revêtement et une faible cohésion des particules, ce qui affaiblit l'adhérence du dépôt.

L'éloignement de la buse de projection par rapport au substrat conduit à une diminution de la densité de dépôt projeté, ce qui entraîne une faible cohésion et une porosité importante . Ces observations permettent en outre de mettre en évidence la distance de tir.

Pour l'échantillon n°4 qui est bâti à partir d'une distance de tir égale à 15cm, le dépôt est précédé par un préchauffage à l'aide d'un chalumeau oxy-acétylénique. Nous avons effectué des analyses chimiques dans le revêtement, l'interface et le substrat. Nous constatons qu'il y a une légère variation de la composition chimique dans ces derniers ; ce qui prouve que ces éléments sont diffusés et donnent naissance à une liaison chimique. Les figures 5.9 , 5.10 , 5.11 montrent l'évolution de la composition prise respectivement dans le revêtement proche de l'interface, de l'interface substrat – revêtement et dans le revêtement. L'analyse de la diffraction a révélé la présence de Ni et des traces de chrome dans le substrat qui étaient absents dans sa composition nominale.

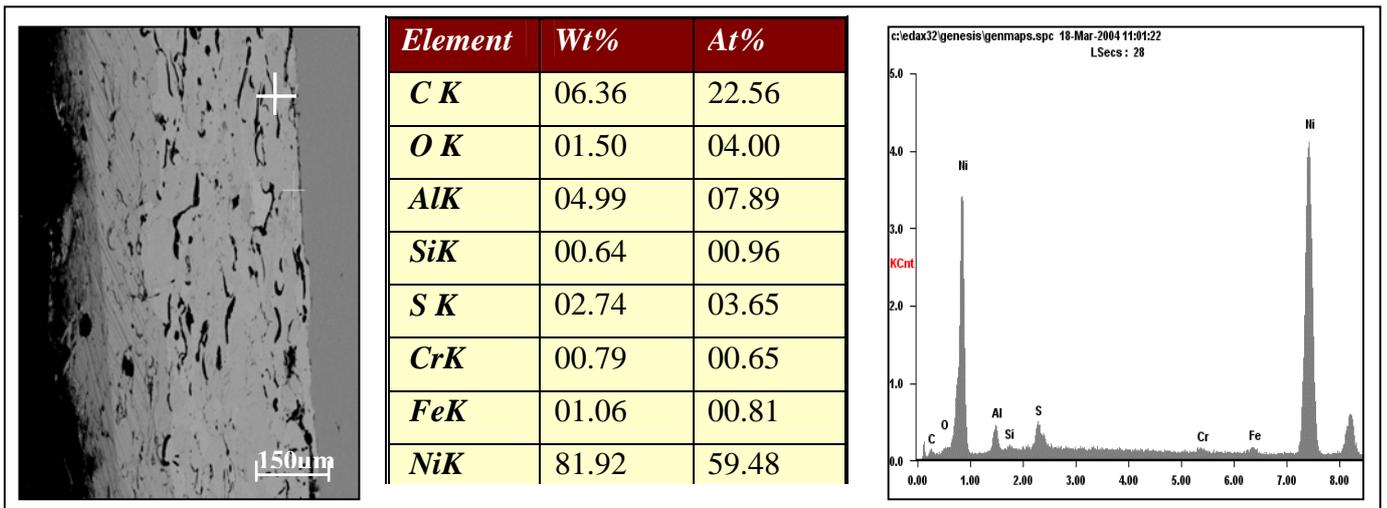


Figure 5.9 : Composition chimique du revêtement.

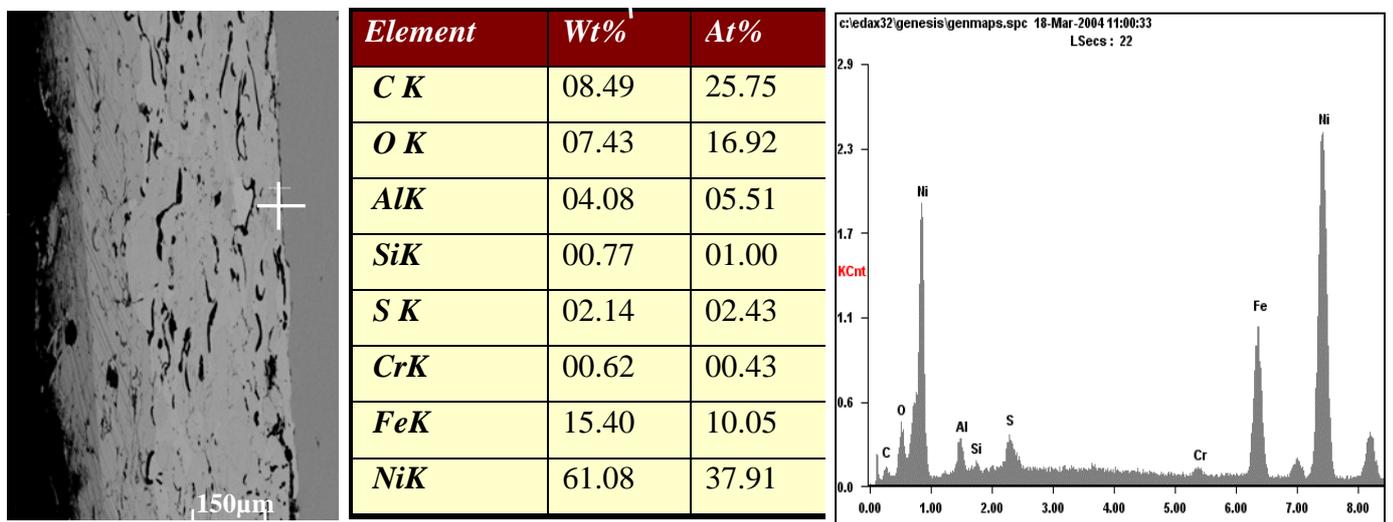


Figure 5.10: Composition chimique à l'interface.

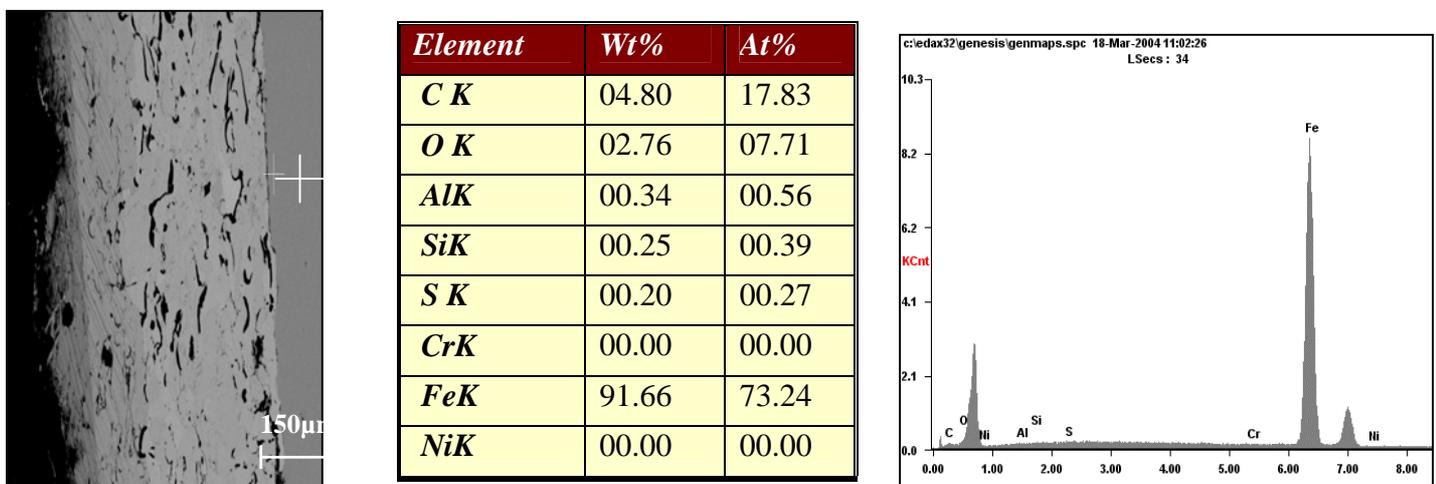


Figure 5.11: Composition chimique du substrat.

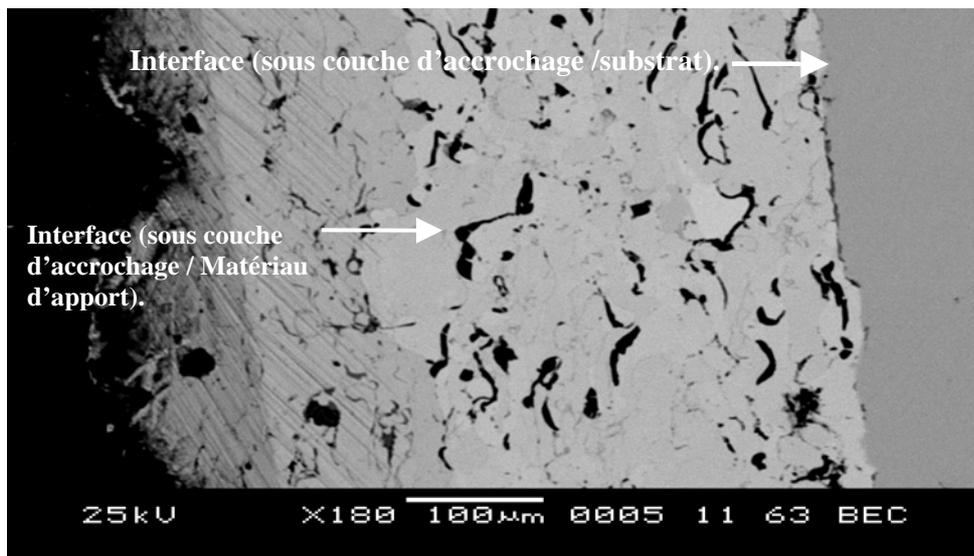


Figure 5.12 Section transversale de l'échantillon N°5

Pour l'échantillon n°5 réalisé avec une sous couche d'accrochage, l'observation au microscope électronique à balayage a montré une bonne stratification des couches projetées ; ainsi que l'étalement des particules entre le dépôt d'une part et le substrat d'autre part.

Cette couche d'accrochage a pour rôle de diminuer les contraintes résiduelles dans le revêtement et de réaliser des dépôts à gradient de composition chimiques.

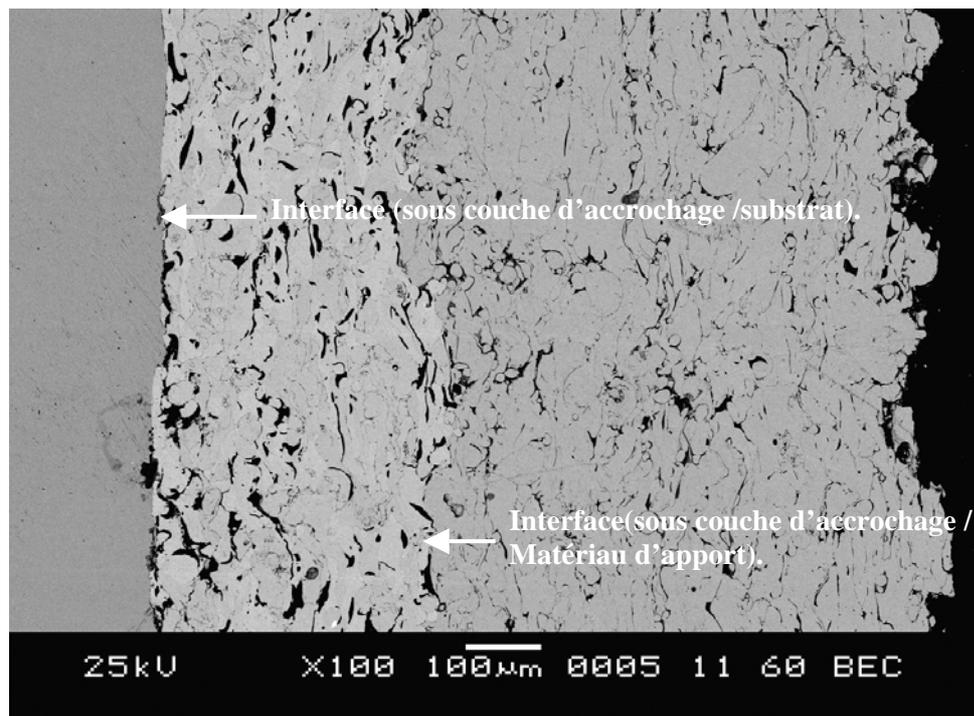


Figure 5.13 Coupe transversale de l'échantillon N°06.

Cette structure en lamelle cohésive explique les bonnes conditions de fusion des particules lors de la projection thermique, ainsi que la bonne répartition entre l'énergie cinétique et thermique, avec la présence de quelque porosité interfacielle.

Pour cet échantillon préchauffé, à l'accrochage mécanique s'ajoute un accrochage métallurgique résultat de diffusion des éléments chimiques. Ces derniers viennent renforcer la liaison (revêtement /substrat).

Cette propriété structurale et métallurgique explique la bonne adhérence du revêtement.

5.2. Contrôle non destructif par courant de Foucault

Les caractéristiques géométriques (état de surface) ont été évaluées par le moyen d'un contrôle non destructif qui est le courant de Foucault.

Dans ce type de contrôle on considère que l'échantillon possède les mêmes caractéristiques électrique et magnétiques c'est-à-dire que la conductivité électrique et la perméabilité magnétique sont constantes dans tout l'échantillon (le même matériau). La seule variable est l'aspect géométrique de l'échantillon (revêtement). Cela implique uniquement une variation dimensionnelle.

Les courbes obtenues des figures 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 mettent en relief les différents états de la surface des échantillons et nous indiquent l'homogénéité et l'uniformité du revêtement réalisées.

En effet on remarque à travers la variation de l'impédance mesurée à la borne du capteur par courant de Foucault l'état des différents paramètres affectés par la circulation des courants de Foucault.

Les courbes obtenues permettent de diagnostiquer cet état de surface car les échantillons présentent une homogénéité du revêtement.

Les courbes obtenues pour l'échantillon n°1 et n°3 présentent des fluctuations cela indique que les revêtements de ces deux échantillons ne sont pas uniformes. Le pic trouvé dans la courbe de l'échantillon n°5 est de très forte amplitude, cela indique que le revêtement contient une grande variation de conductivité à cause de la présence probable d'un élément ferromagnétique (impureté) .

Contrairement aux échantillons n°2, n° 4 et n°6 ou la constance de la courbe indique que l'état de surface est bon et que le revêtement est uniforme et homogène.

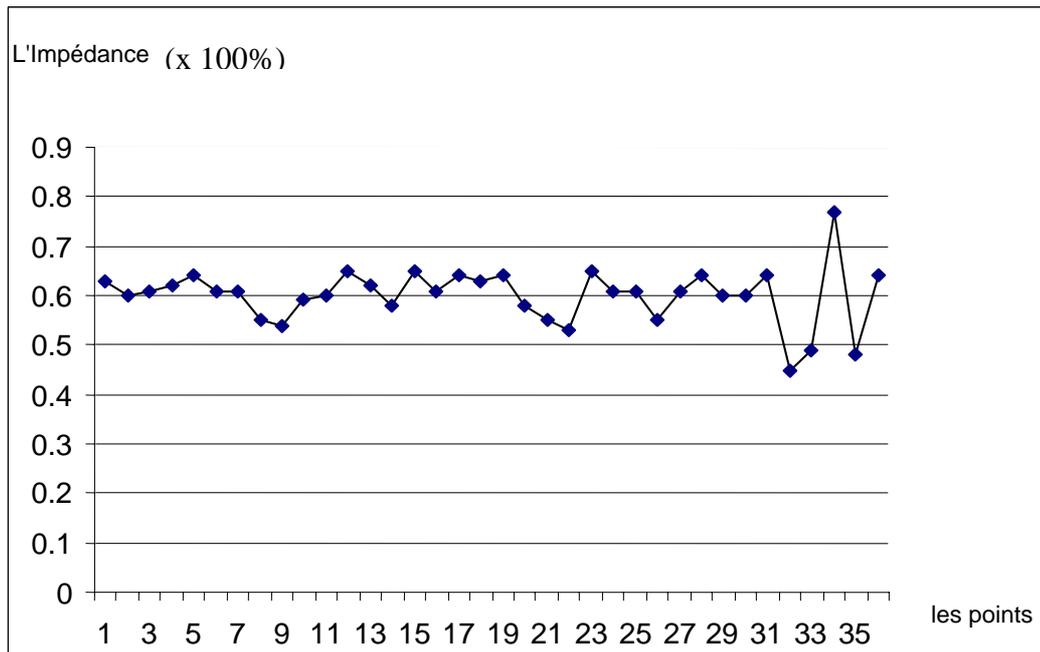


Figure 5.14 variation de l'impédance de l'échantillon N° 1

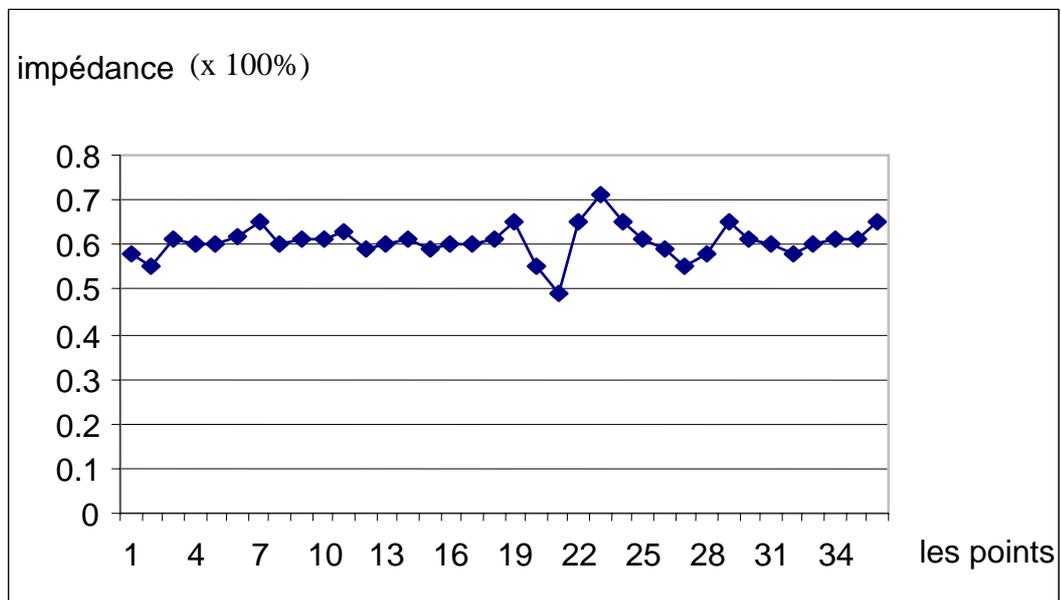


Figure 5.15 variation de l'impédance de l'échantillon N° 2

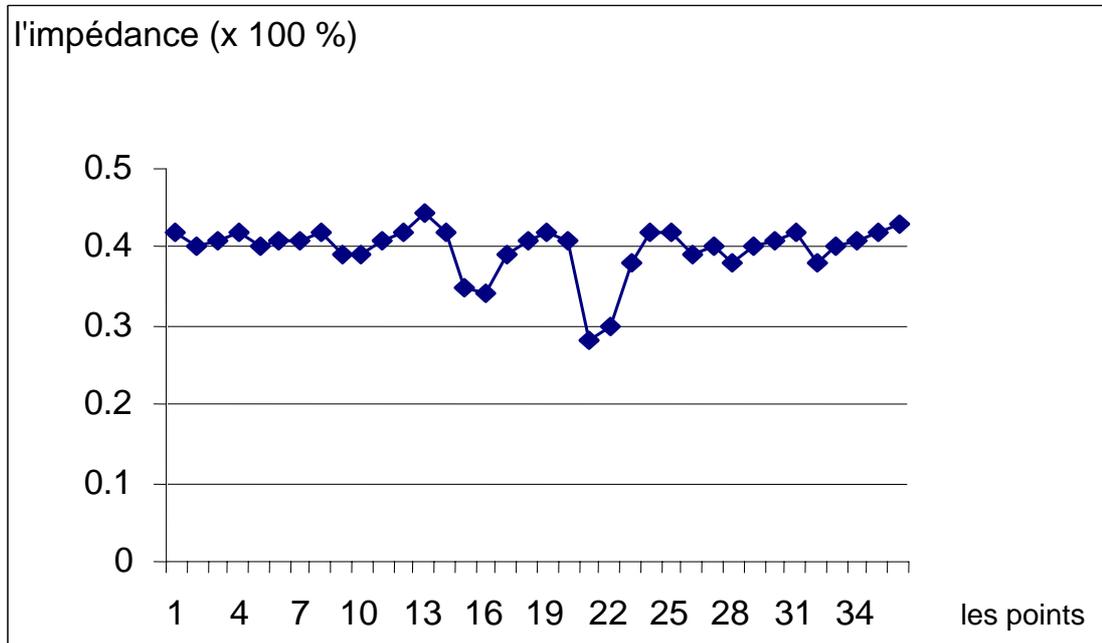


Figure 5.16 variation de l'impédance de l'échantillon N° 3

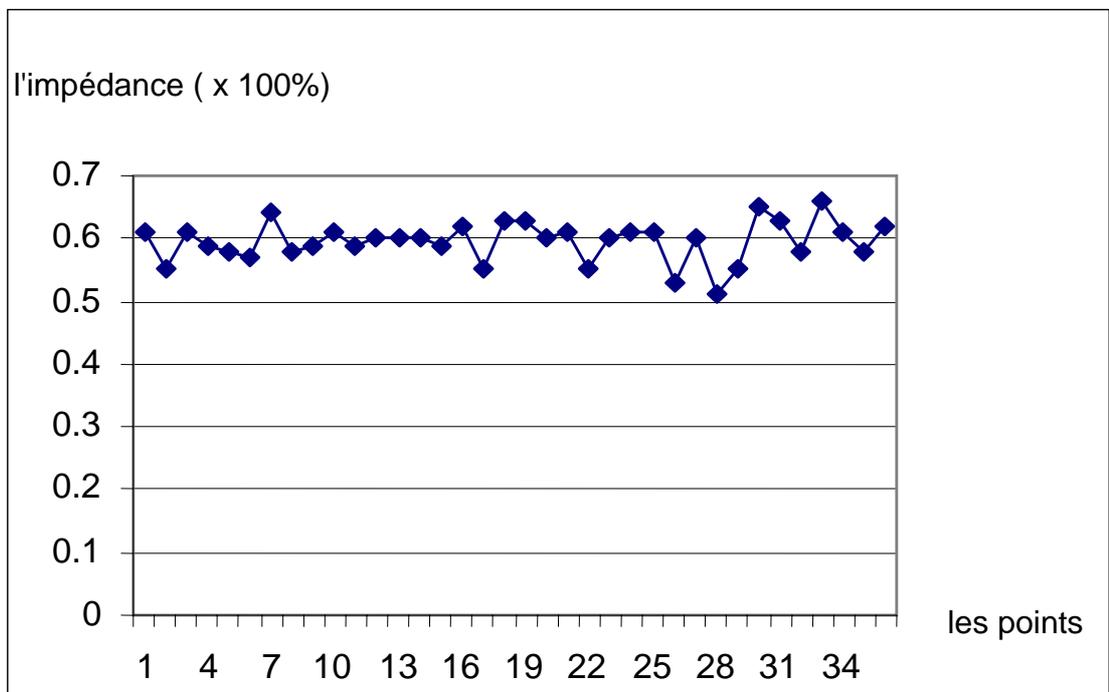


Figure 5.17 variation de l'impédance de l'échantillon N° 4

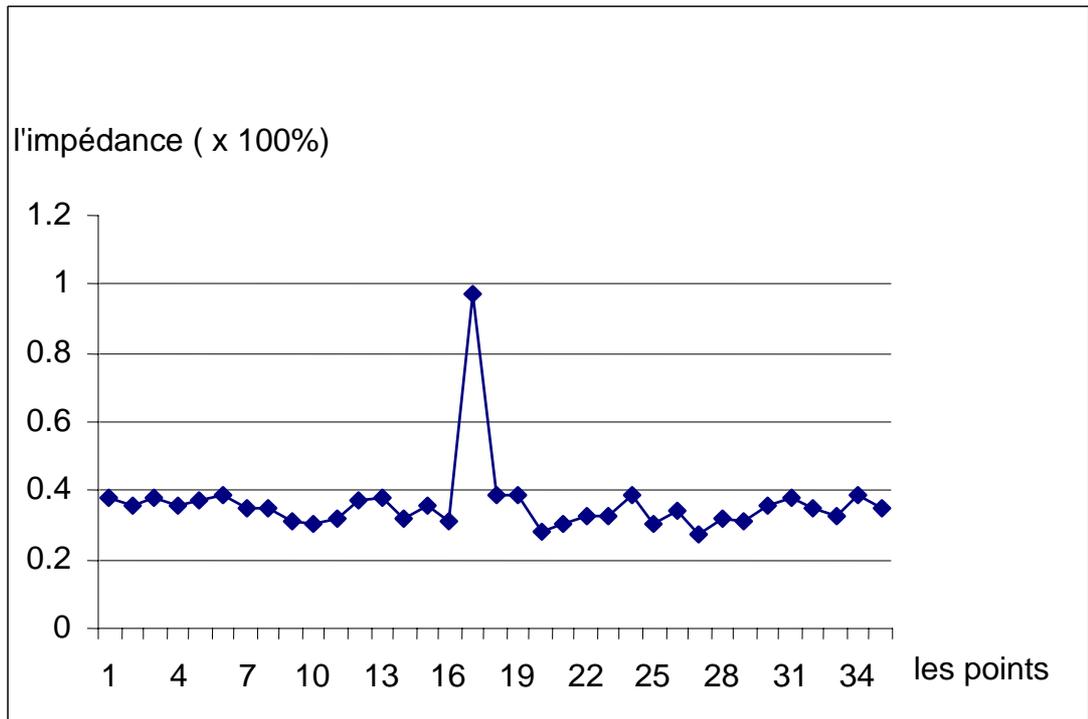


Figure 5.18 variation de l'impédance de l'échantillon N° 5

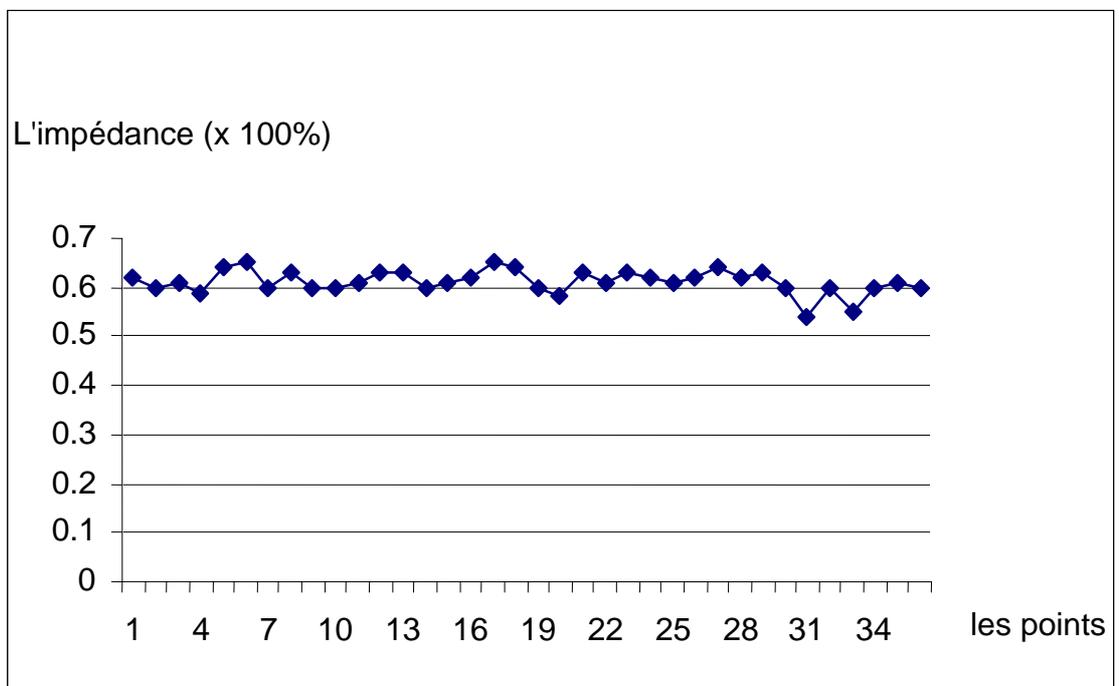


Figure 5.19 variation de l'impédance de l'échantillon N° 6

5.3. Contrôle non destructif par ultrason :

Le contrôle non destructif par ultrason a été employé dans cette étude, principalement pour estimer l'adhérence entre le substrat et le revêtement, afin de d'étudier l'influence des paramètres opératoires de la projection thermique sur la qualité d'adhérence.

S'il y a une bonne adhérence entre le revêtement et le substrat, une partie de l'onde ultrasonore passe au niveau de l'interface et se réfléchit sur la face arrière de substrat.

Si l'échantillon possède une mauvaise adhérence c'est-à-dire qu'il y a une couche d'air entre le revêtement et le substrat, les ondes ultrasonores sont totalement ou partiellement réfléchies vers la sonde émettrice selon la qualité d'adhérence.

L'écho correspondant au trajet dans le revêtement ne peut être visualisé sur l'oscillogramme car l'épaisseur du revêtement est trop faible et l'écho du revêtement sera superposé avec l'écho d'entrée dans le substrat.

Dans l'oscillogramme correspondant à l'échantillon n°6, on distingue nettement les trajets (aller-retour) à l'intérieur de l'échantillon (substrat/revêtement).

Les amplitudes sont décroissantes en exponentielle à cause de phénomène d'atténuation des ondes longitudinales dans le matériau.

Nous pouvons donc conclure que pour cet échantillon l'adhérence est excellente le même phénomène est observé sauf que la netteté des signaux est moindre pour l'échantillon n° 5. Il y a donc une bonne adhérence mais de moins bonne qualité.

Concernant les quatre échantillons (échantillon n° 1, 2,3 et 4).l'oscillogramme montre un écho d'entrée dans l'échantillon très large et les échos de la face arrière des échantillons n'apparaissent pas. Ceci veut dire que l'onde est partiellement réfléchi à l'entrée du revêtement et est totalement réfléchi sur la face arrière du revêtement à cause de la présence d'une couche d'air à l'interface (revêtement /substrat) .En conséquence sur les quatre échantillons l'adhérence est de mauvaise qualité.

On peut classer l'adhérence des échantillons par ordre croissant, de qualité d'adhérence :

Echantillon n°1, échantillon n°3, échantillon n°2, échantillon n°4, échantillon n°5, échantillon n° 6.

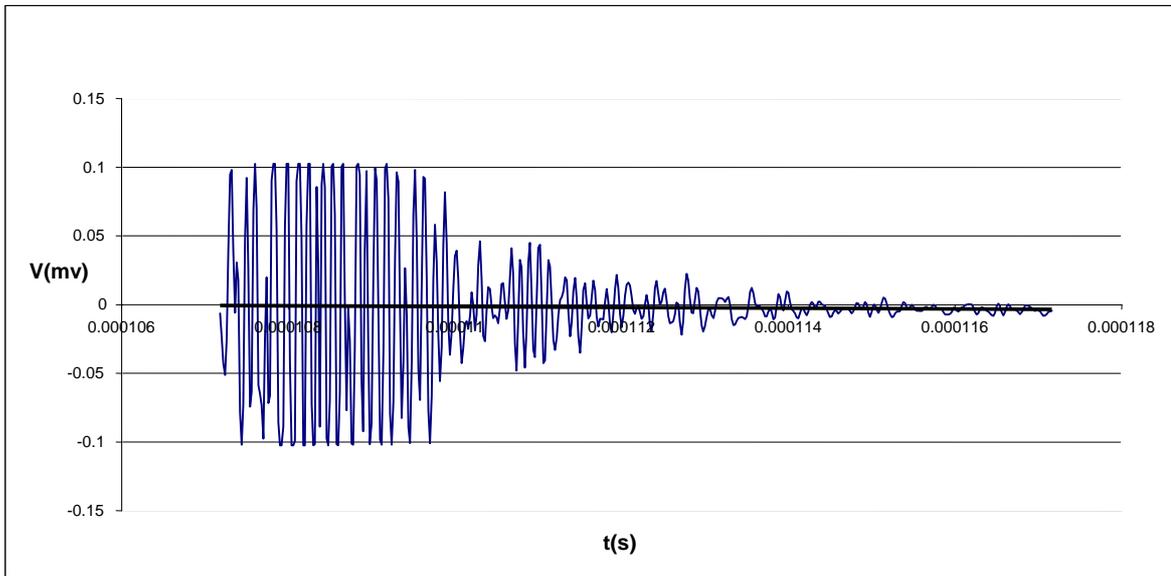


Figure 5.20 échogramme de l'échantillon N°:01

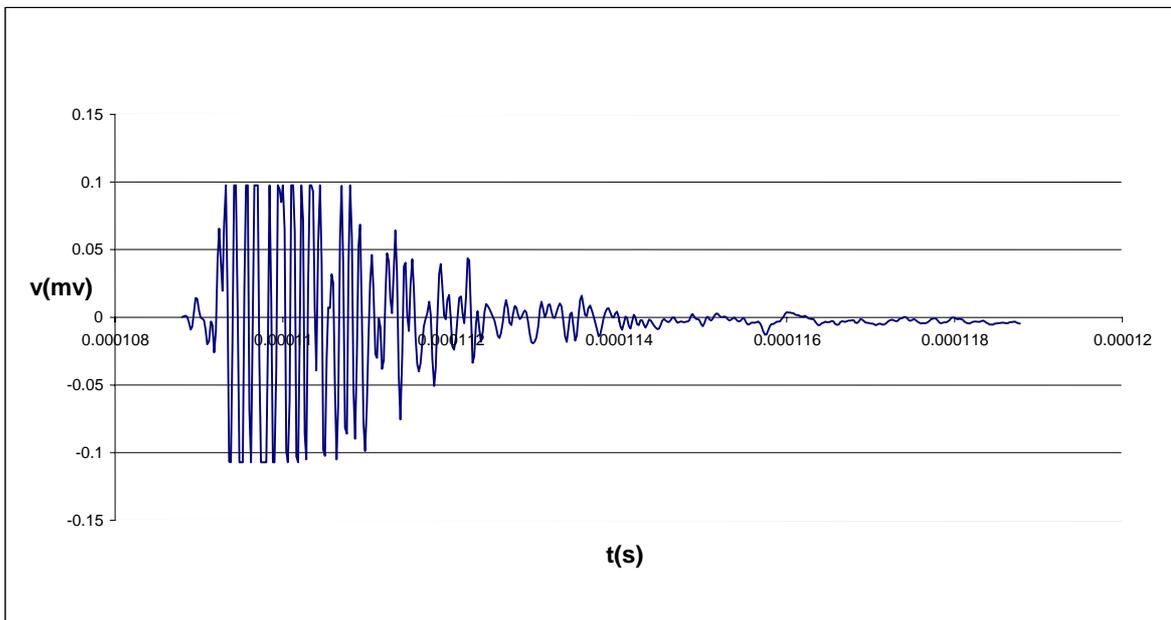


Figure 5.21 échogramme de l'échantillon N°:02

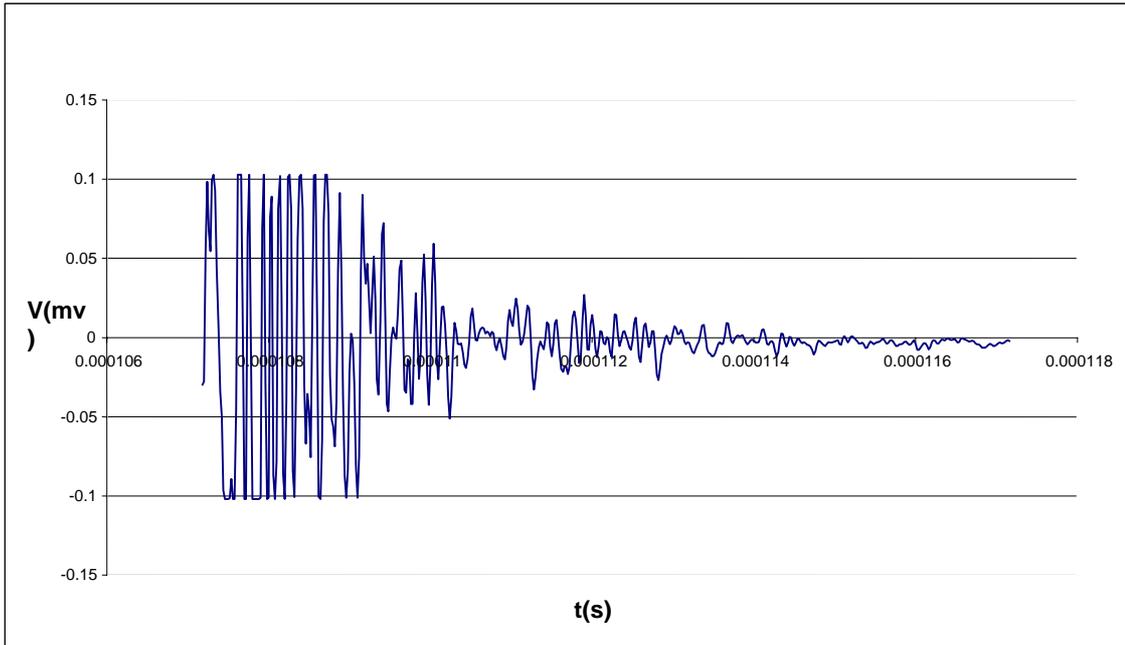


Figure 5.22 échogramme de l'échantillon N°:03

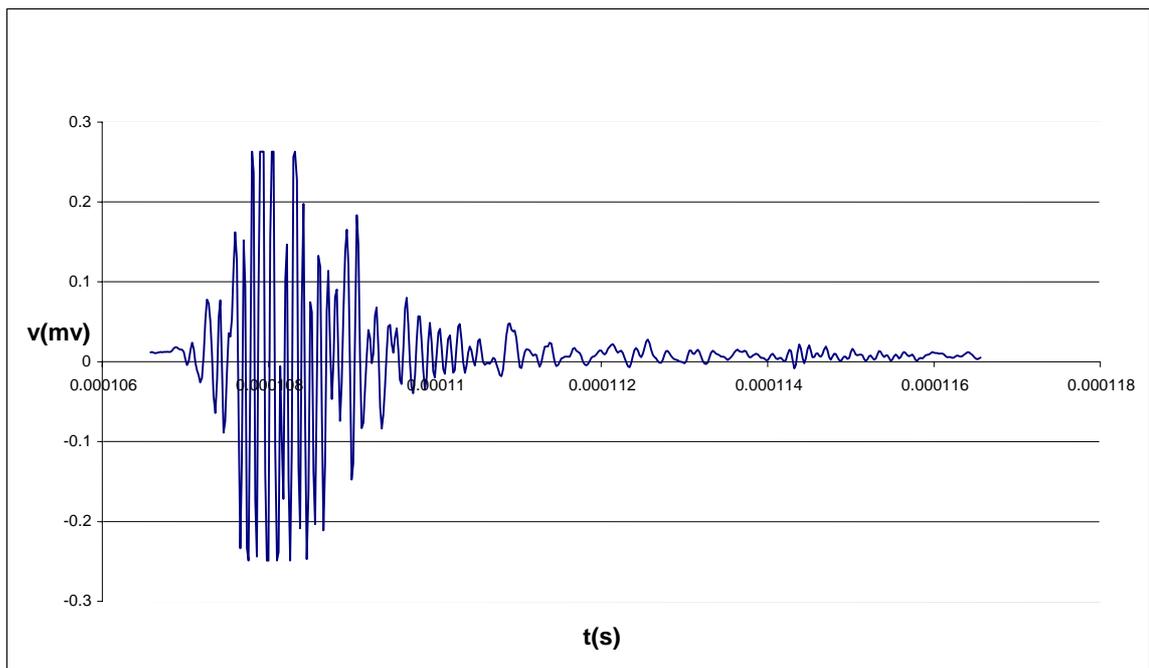


Figure 5.23 échogramme de l'échantillon N° :04

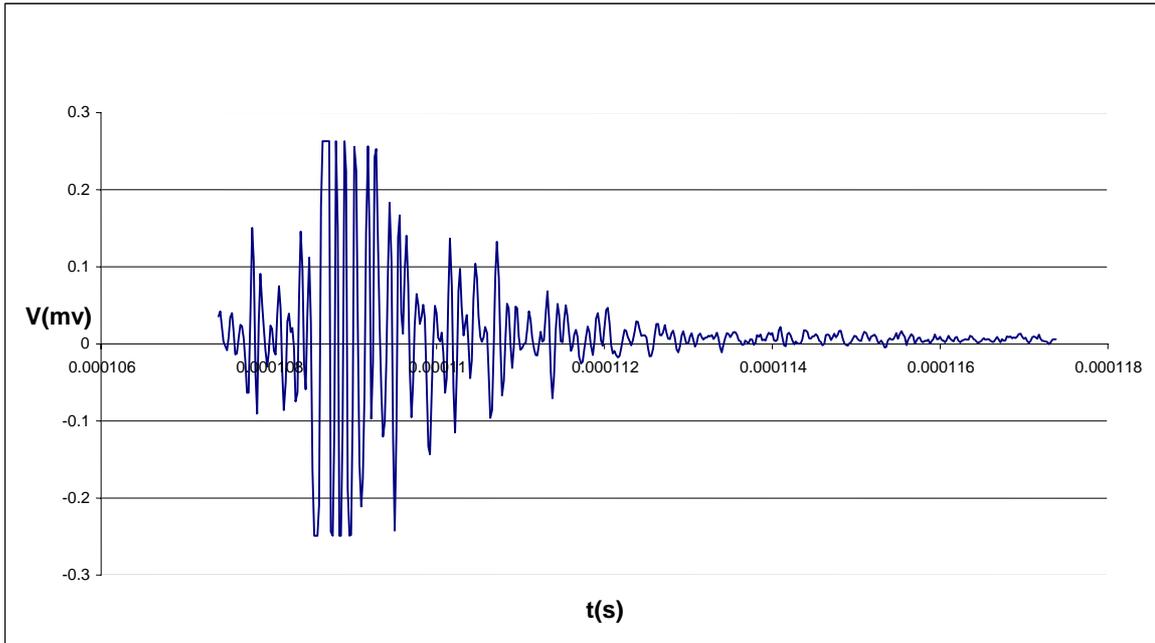


Figure 5.24 échogramme de l'échantillon N°:05

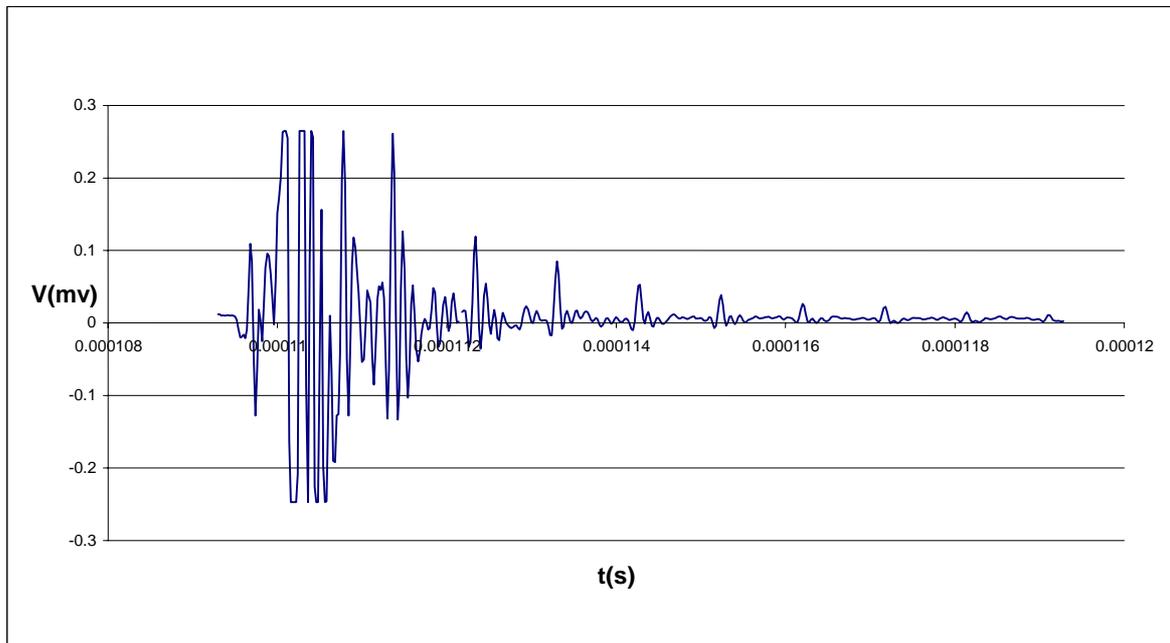


Figure 5.25 échogramme de l'échantillon N°:06

5.4. Test d'arrachement par traction :

Il s'agit à travers ce test de mesurer la valeur de la contrainte d'adhésion du revêtement pour chaque échantillon, et de confirmer les résultats obtenus par les méthodes non destructives

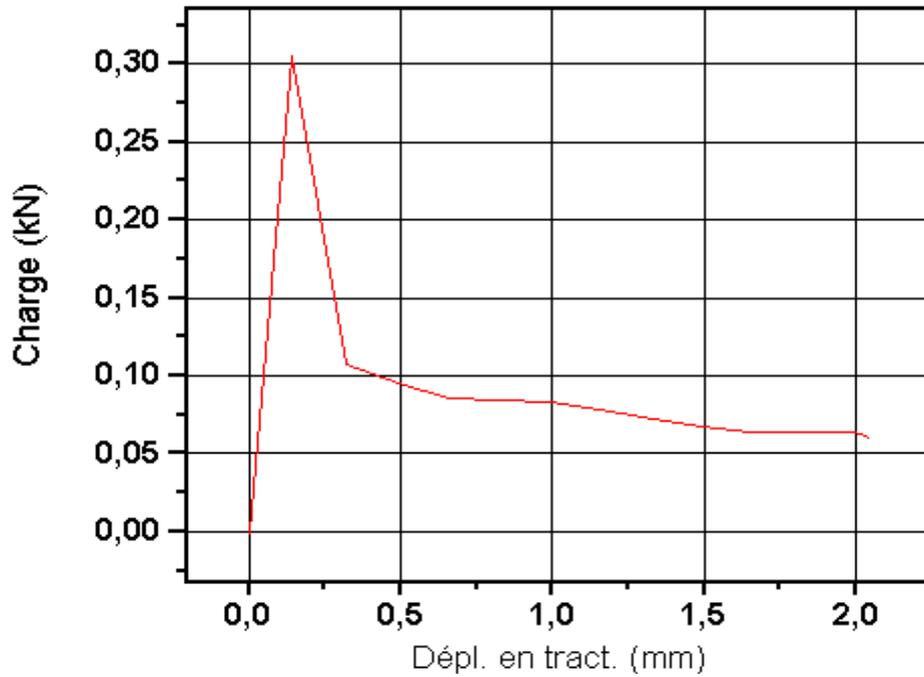


Figure 5.26 Test d'arrachement par traction de l'échantillon n°01

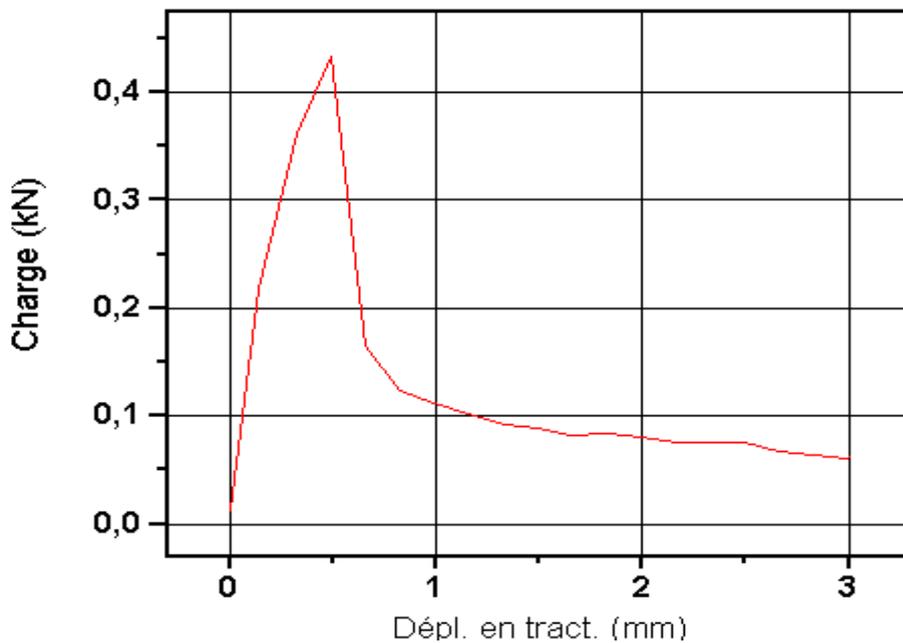


Figure 5.27 Test d'arrachement par traction de l'échantillon N°2.

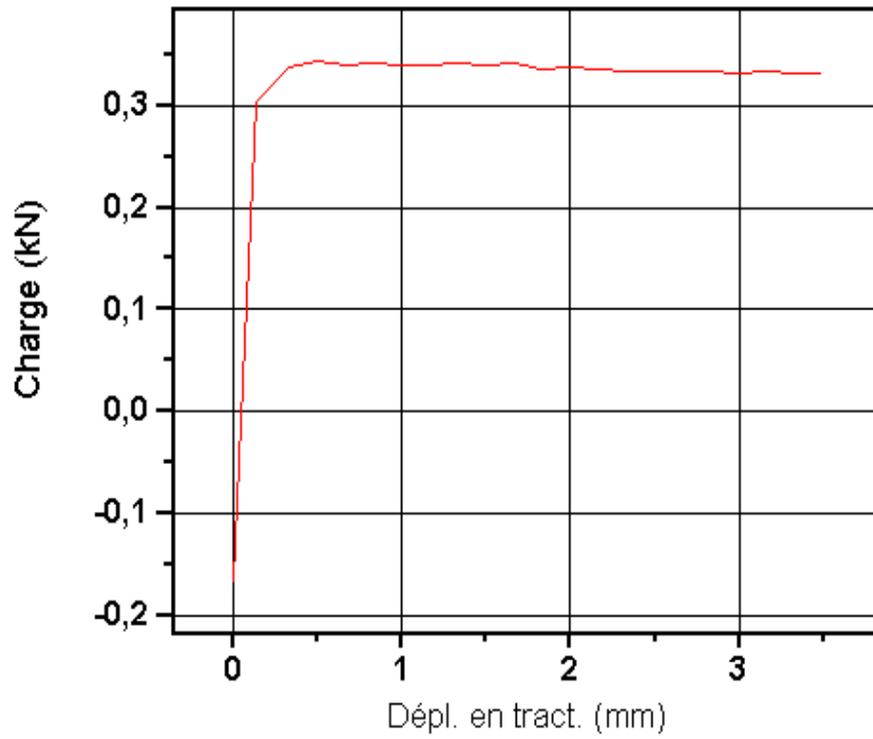


Figure 5.28 Test d'arrachement par traction de l'échantillon N°3.

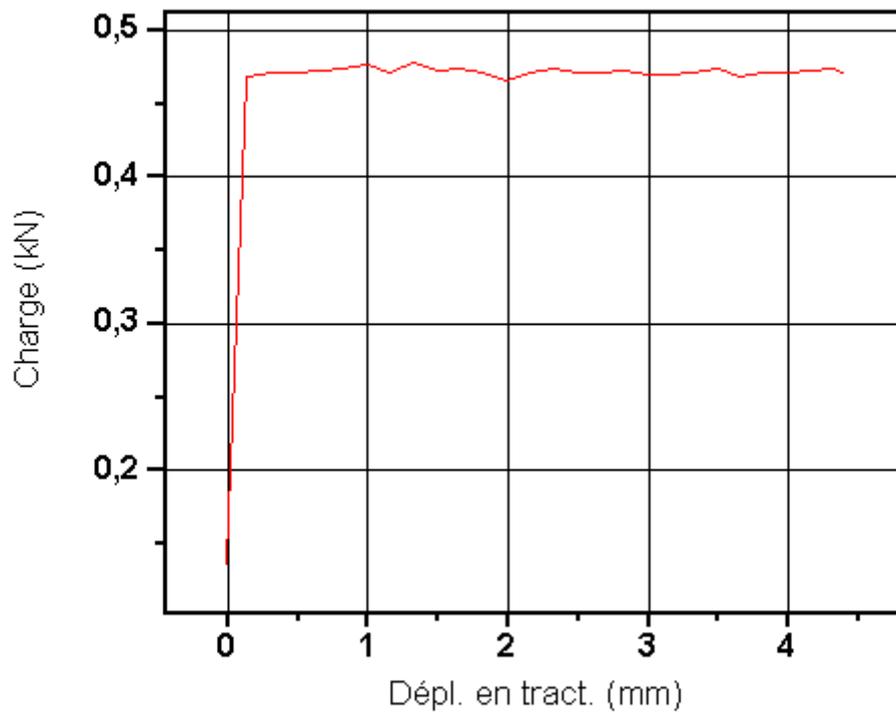


Figure 5.29 Test d'arrachement par traction de l'échantillon N°04.

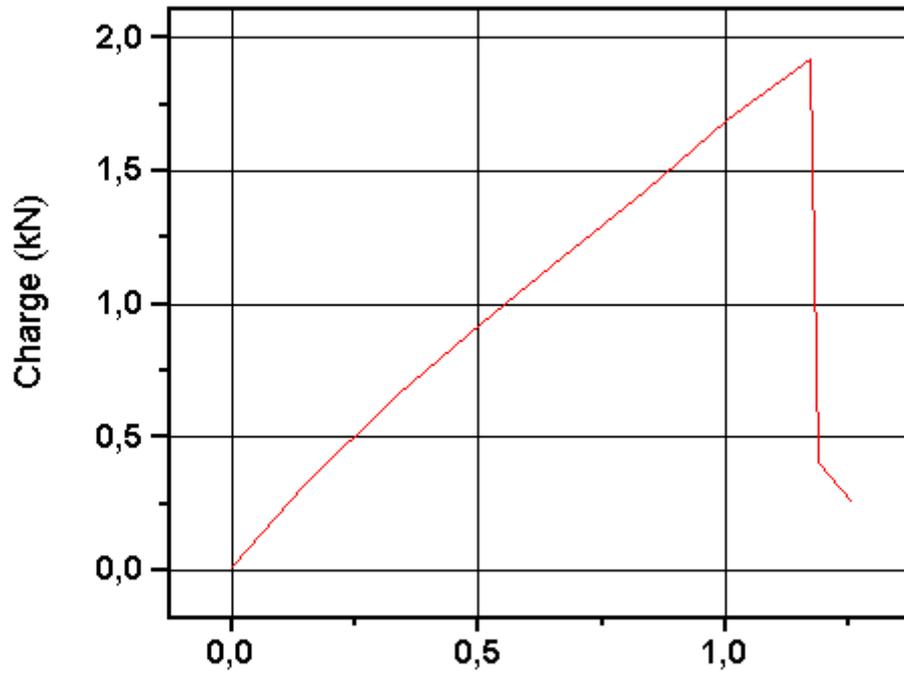


Figure 5.30 Test d'arrachement par traction de l'échantillon N°05.

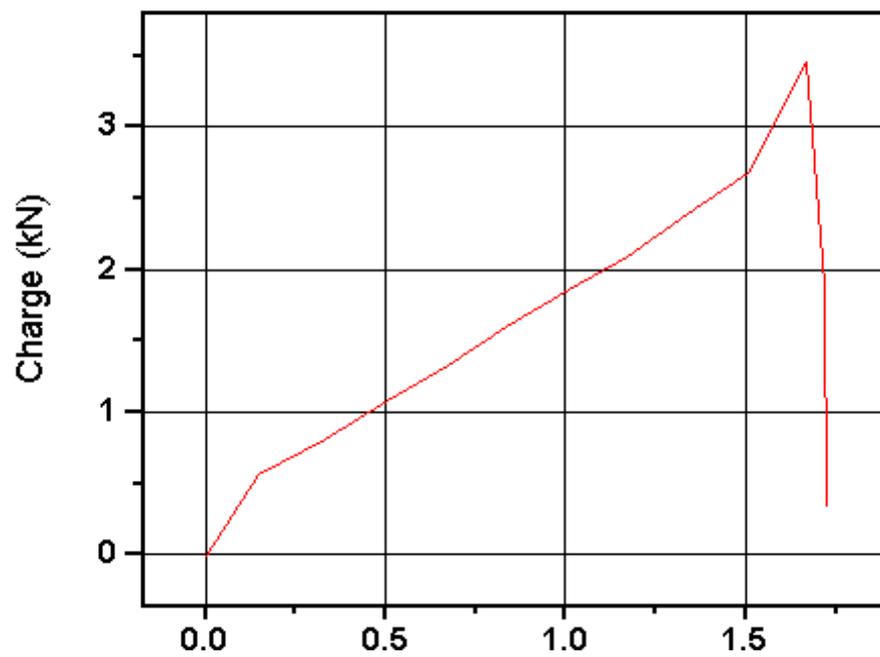


Figure 5.31 Test d'arrachement par traction de l'échantillon N°06.

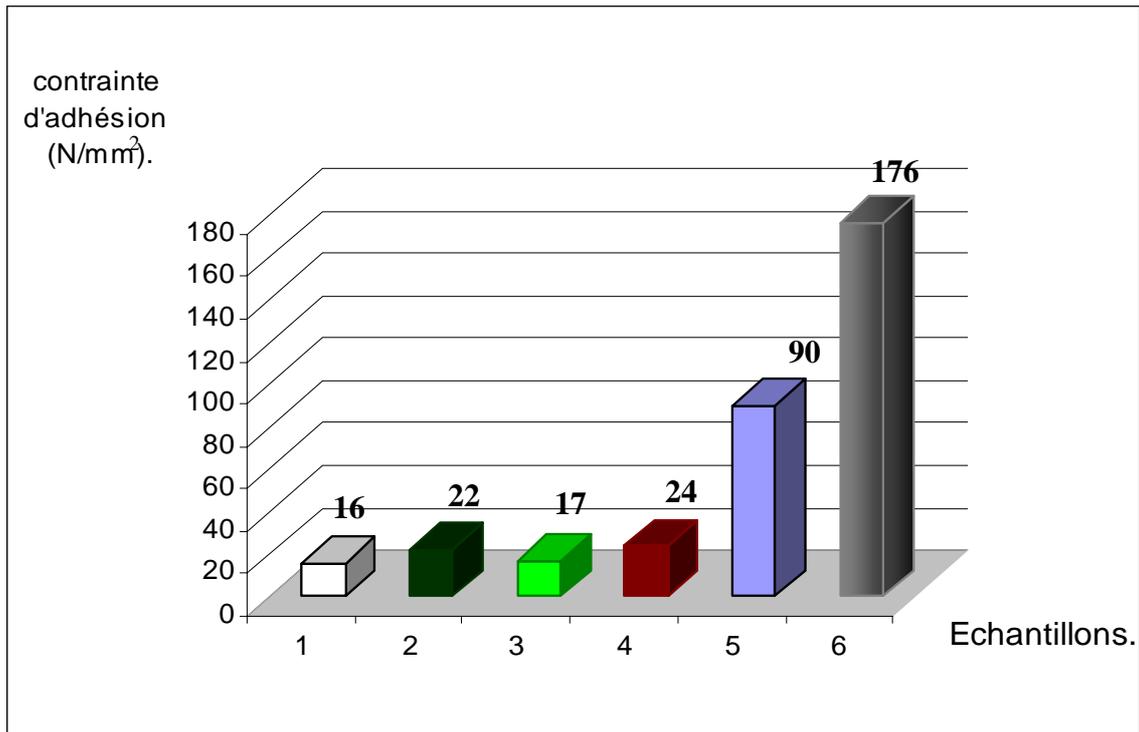


Figure 5.32 évolution du contrainte d'adhésion pour les échantillons

A travers les résultats obtenus après la réalisation de test d'arrachement, on note l'importance de la sous couche d'accrochage. En effet les échantillons réalisées avec la sous couche d'accrochage (échantillon n° 5 et 6) présente une contrainte d'adhésion relativement meilleure par rapport aux échantillons réalisée sans sous couche d'accrochage.

Pour l'échantillon n° 4, la valeur de contrainte d'adhésion est supérieure à l'échantillon n°1, 2 et 3 parce que le préchauffage assure une liaison métallurgique entre le substrat et le revêtement par le phénomène de diffusion des éléments chimiques.

Les échantillons n° 1, 2 et 3 possèdent une valeur de contrainte d'adhésion faible par rapport aux autres échantillons, la seule variable ici est la distance de tir.

L'échantillon n° 1 a une valeur de contrainte d'adhésion la plus faible, cela est dû au non homogénéité de revêtement.

L'échantillon n °3 possède aussi une faible valeur de contrainte d'adhésion due au taux élevé de la porosité qui existe dans le revêtement. Cette dernière favorise la rupture au niveau de l'interface.

Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus avec le contrôle non destructif par courant de Foucault et ultrason

Conclusion

L'objectif fondamental de notre travail est d'étudier le contrôle non destructif pour qualifier le revêtement déposé par la projection à flamme (l'adhérence, l'état de surface).

Nous avons utilisé la technique du courant de Foucault et l'ultrason pour évaluer l'uniformité du revêtement et l'adhérence entre le substrat et revêtement.

L'approche et l'étude expérimentale concernant le contrôle non destructif par courant de Foucault et ultrason ont contribué à la détermination de la fiabilité et la performance de cette technique de caractérisation.

La technique de contrôle non destructif a montré son importance dans l'évaluation des caractéristiques géométriques et mécaniques des revêtements.

Des paramètres opératoires de la projection thermique variées ont été utilisées afin d'obtenir différents revêtements de qualité variable (porosité, état de surface, adhérence), les résultats de contrôle ont montré que :

Une faible distance de tir pour la projection thermique cause une mauvaise adhérence et peut nuire aux propriétés mécaniques, ce qui donne un état de surface non uniforme.

L'éloignement excessif de la buse de projection par rapport au substrat confère au dépôt une porosité et un taux d'oxydes élevés conduisant à une mauvaise cohésion des particules, ceci rend également difficile l'obtention d'un bon état de surface

On peut dire pour un revêtement métallique par projection thermique avec un chalumeau oxyacétylénique et dans les mêmes conditions que les autres, la rugosité est indispensable, elle permet de assurer une liaison mécanique entre le substrat et le revêtement.

Nous avons montré que le préchauffage du substrat avant le dépôt conduit à la diffusion de quelques éléments chimiques, ces derniers viennent alors de renforcer la liaison (revêtement /substrat) en réalisant un accrochage métallurgique en plus de l'accrochage mécanique.

Le traitement préalable de substrat par une sous couche d'accrochage a permis de réduire la mauvaise qualité d'adhérence du dépôt rechargé par la projection thermique à flamme et améliorer considérablement la qualité d'adhérence du dépôt avec le substrat et acquérir des meilleures propriétés mécaniques de dépôt.

En dépit des résultats obtenus, cette étude pourrait être complétée et améliorée par l'application de d'autres méthodes de caractérisation non destructives telles que le bruit de BAR KHAUSEN, radiographie et la technique à flux de fuite magnétique.

Références bibliographiques

1. Maurice Ducos "Revêtement par projection thermique". Technique de l'ingénieur M5 1645.
2. Guide pratique de la projection thermique. CETIM (1989).
3. B. Hanz Projection thermique, "matériel, cours de formation continue". LERMPS. IPSE. 8. (10. Octobre 1997).
4. T. Sahraoui . "Alternative au chrome : caractérisation et étude tribologique des revêtements élaborés par projection thermique à flamme de type HVOF." Thèse de Doctorat d'état Blida (2003).
5. G. Montavon Projection thermique, industrialisation. Cours de formation continue. LERMPS. IPSE 19. 21. Novembre 1997.
6. H. Claire, E. Crawell Thermal spray coating Metal Hand book Vol 5. Edition 1982, p 361.
7. W. E. Ballard Metal spraying and flamme deposition of ceramics and plastic 4^{ème} edition London (1963).
8. J H. Zaat Proceeding of the 9th international thermal spraying conference la haye, mai (1980) pp 19-23.
9. P. Ghangnon, A. Tronche, P. Fau chais "Frottement des dépôts d'alumine projetés par plasma industrie céramique" N° 805 (1986) pp 319-324.
10. S. Audisio, M. Caullet, A. Galerie, H. Magille "Revêtement et traitement de surface ".
11. K. krzywosz et G. Dou" Comparison of electromagnetic techniques for non destructives inspection of ferromagnetic tubing". (1996).

12. T.R Schmidt "History of the remote- field eddy current inspection technique" (1996) .
13. David mackintosh Inspecting ferromagnetic tubes with remote – field eddy current "identifying metal loss and permeability variation" . russel technologie. INC (1995).
14. Haddad .A Mémoire de magistère "conception et analyse d'un système de contrôle non destructif par courant de Foucault pulsée" .(2003)
15. technique d'ingénieur R 1400 édition 1998
16. B. Helifa Thèse de magistère, "contrôle non destructif par courant de Foucault". Université de Laghouat, (octobre 2001)
17. M. Zergoug "réalisation des sondes et caractérisation non destructif par courant de Foucault de couches de rechargement et de revêtement dans les matériaux conducteurs", conférence maghrébine sur le contrôle non destructif (COM CND97), Alger, Algérie, pp 386-393, (juin 1997).
18. Gary. L, Burkhart and Jeffrey. S "Stote magnetic sensor for measurement of stainless steel southvest research institute NDE Science and technology division". P. O. Drawer 28510 San Antonio, (Texas 2000).
19. J and H. Krantkramer "Ultrasonic testing of material", (1983).
20. J. Mc gonnagle Essais non destructifs, métaux et matériaux divers. Eyrolles 1967.
21. M.Billy. G. Quentin" Backscattering of acoustic waves by randomly rough surfaces of elastic- solids immersed in water", J.A.S.A. 72 . (1982).
22. R. C. Tripathi, G. S. verma "Ultrasonic attenuation as function of temperature in 1% carbon steel". J.A.S.A 32 (1973).
23. E. P Papadakis L. C, Lynnworth.K.A, Kafowler E. H. "ultrasonic attenuation and velocity in hot specimens by momentary contact method with pressure coupling and some,

results on steel to 1200° C". The journal of the acoustic society of American (J. A. S. A)
53. (1972).