

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en
Génie mécanique

Option : Matériaux pour l'Ingénierie Mécanique

Thème

**Effet des recuits à 600 et 800°C sur la
microstructure et les propriétés tribologiques d'un
revêtement en acier hypereutectoïde élaboré par la
technique de projection thermique**

Réalisé par :

M^r. GUERMOUCHE Abdelmadjid

Soutenu devant le jury :

M^r. Kamel YAYA

MCA

Université de Bejaia

M^r. Abdelatif BELAMRI

MCB

Université de Bejaia

M^r. Kamel OURARI

MAA

Université de Bejaia

proposé et dirigé par :

Professeur Abdelaziz ATI

Président

Examineur

Examineur

Année universitaire : 2015-2016

Remerciements

Tout d'abord je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de réalisé ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement

Le Pr ATI ABDELAZIZ d'avoir proposé et dirigé ce travail.

Monsieur YAYA, qui m'a fait le plaisir et l'honneur de présider le jury.

Les membres de jury composé de BELAMRI, OURARI d'avoir examiné mon travail et participé aux jurys.

Tout le personnel du hall de Technologie.

Également monsieur TATA de l'université d'ALGER (USTHB).

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	a
Liste des tableaux	a
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I-1 Introduction	2
I-2 L'origine de l'usure	2
I-3 Différents types d'usure.....	3
I-4 Qu'est que la projection thermique	3
I-5 Formation et structure des dépôts	4
I-6 Les différents procédés de projection thermique.....	5
I-6-1 Projection à flamme	5
I-6-1-1 Projection flamme-poudre	5
I-6-1-2 Projection flamme fil	6
I-6-1-3 Les gaz de projection	7
I-6-2 Projection par arc électrique entre deux fils	7
I-7 Analyse comparative des procédés de projection thermique.....	8
I-8 Différentes techniques de préparation de surface.....	9
I-8-1 Dégraissages.....	9
I-8-2 Décapage	9
I-8-3 Sablage	10
I-8-4 Préchauffage.....	10
I-9 Caractéristiques générales des revêtements.....	10
I-9-1 Structure métallurgique	10
I-9-2 La porosité et l'oxydation	11

I-9-3 Adhérence.....	12
I-9-4 La densité	12
I-9-4 La dureté.....	12
I-9-5 contraintes résiduelles	12
I-10 paramètres influençant sur la qualité des revêtements	13
I-10-1 Pression et débits des gaz	13
I-10-2 Distance de projection.....	13
I-10-3 Angle de projection	13
I-10-4 Vitesse relative pistolet-substrat.....	14
I-11 Fiabilité des revêtements	14
I-12 Travaux antérieurs sur les revêtements en acier.....	14

Chapitre II : Matériaux et Technique Expérimentales

II-1 Introduction	19
II-2 Matériaux utilisés	19
II-2-1 Le substrat.....	19
II-2-2 Matériau d'apport.....	19
II-3 Elaboration des échantillons.....	20
II-3-1 Première configuration.....	20
II-3-2 deuxième configuration	20
II-4 Préparation de surfaces à revêtir	21
II-4-1 Dégraissage	21
II-4-2 Sablage (Grenailage).....	21
II-5 Réalisation de dépôt	21
II-5-1 Paramètres de projection du procédé à flamme fil (Entreprise SNC ATRA).....	21
II-6 Les post-traitements de recuit	22
II-7 Techniques d'analyse et caractérisation des dépôts	23

II-7-1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	23
II-7-2 Observation métallographique	23
II-7-2-1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique.....	23
II-7-2-2 Microscope optique (MO)	23
II-8 Tenue à l'usure	24
II-8-1 Description de dispositif	24
II-8-2 Principe du test d'usure.....	26
II-8-3 Procédures des essais	26
II-9 Mesure de micro-duretés des dépôts	26
II-10 Détermination du coefficient de frottement	27

Chapitre III : Résultats et Discussions

III-1 Caractérisation microstructurale	28
III-2 Identification des phases présentes par DRX.....	30
III-2-1 Revêtement brut de projection thermique	30
III-2-2 Revêtement après post traitement de recuit.....	31
III-3 La micro-dureté.....	33
III-4 Tenue à l'usure.....	33
III-4-1 Evolution de la température en fonction du temps pendant l'essai	34
III-5 Coefficient de frottement	35
Conclusion générale	37
Référence bibliographiques	38

Liste des figures

Figure I-1. Principe de la projection thermique	4
Figure I-2. Structure d'un dépôt obtenu par projection thermique	5
Figure I-3. Schéma illustrant la technique de projection thermique à flamme poudre	6
Figure I-4. Schéma illustrant le principe de la projection thermique à flamme fil.	6
Figure I-5. Température de flamme oxy-combustible	7
Figure I-6. Schéma illustrant la technique de projection thermique arc-fil	8
Figure I-7. Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique [10].	11
Figure I-8. Evolution du coefficient de frottement des revêtements brut de projection thermique et recuit à 300°C/90mn. La charge utilisée est de 5N. La distance de glissement total est de 750 m	15
Figure I-9. Micrographie électronique à balayage de la piste d'usure du revêtement en acier hypereutectoïde brut de projection thermique mettant en évidence une distribution de petites particules de la phase métallique qui s'incrustent dans la magnétite Fe ₃ O ₄ . Image en mode rétrodiffusés.	16
Figure I-10. Micrographies électroniques à balayage (Image en mode électrons rétrodiffusés) sur trois zones de la piste d'usure du revêtement en acier hypereutectoïde recuit à 300°C. On distingue clairement l'aspect poreux de la magnétite Fe ₃ O ₄	17
Figure I-11. Micrographies électroniques à balayage d'une zone du cœur de la piste d'usure du revêtement en acier hypereutectoïde recuit à 300°C. Mise en évidence sur la zone encadrée d'un front de propagation de l'oxyde poreux Fe ₃ O ₄ s'étalant sur la phase métallique en blanc	18
Figure II-1. Schéma du pion en acier A60 destiné pour essais d'usure.	20
Figure II-2. Schéma d'un substrat en acier A60 destiné au pour la micrographie, l'essai de dureté et le coefficient de frottement.	20
Figure II-3. Installation de projection thermique flamme-fil de l'entreprise ATRA de Bejaia. Pistolet de projection « MARK 60 » est relié à un tableau de commande qui permet de réguler la pression de l'oxygène (1), la pression de gaz propane (2) et la pression d'air (3).	22
Figure II-4. Microscope optique OPTIKA, équipé d'une caméra CCD.	23
Figure II-5. Configuration pion sur disque permettant le teste d'usure en contacte surfacique.	24

Figure II-6. Schéma du dispositif d'essais d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif	24
Figure II-7. Dispositif d'essai d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif. ...	25
Figure II-8. Détail sur la position du pion par rapport à la surface du disque rotatif mettant en évidence un bon contact surfacique du revêtement avec la surface du pion.....	25
Figure II-9. Micro-duromètre SHIMADZU type HMV-2, utilisé pour nos essais.....	27
Figure II-10. Illustration du dispositif disque rotatif pion stationnaire type CSM.	27
Figure III-1. Microstructures du dépôt en acier ASM12 brut projection réalisé par le procédé flamme fil. La phase de contraste gris constitue la phase oxyde et celle en blanc représente la phase métallique.....	28
Figure III-2. Microstructure du dépôt en acier ASM12 réalisé par le procédé flamme fil, la phase en blanc est identifiée comme la phase métallique et la phase grise concerne les oxydes.	29
Figure III-3 : Spectre DRX de revêtement brut de projection thermique mettant en évidence la présence de deux phases métallique (ferrite Fe- α et austénite Fe- γ) et deux oxydes FeO et Fe ₃ O ₄	30
Figure III-4. Morphologie lamellaire typique du revêtement en acier hypereutectoïde élaboré par projection thermique flamme-fil. Observation au MEB en électrons rétrodiffusés. Les phases notées (a), (b), (c) représentent respectivement la phase métallique base Fe, oxyde FeO et oxyde Fe ₃ O ₄	31
Figure III-5. Spectres DRX du revêtement en acier hypereutectoïde, après post traitements de recuit aux températures 600 et 800°C.	32
Figure III-6. Micro dureté Vickers sous une charge 500g des dépôts, brut et autres après les différents post traitement. Les barrettes de chaque histogramme indiquent la valeur maximale et la valeur minimale après 12 mesures réalisées sur chaque revêtement. Les résultats du brut de projection thermique sont ceux obtenus par Belamri.....	33
Figure III-7. Perte de masse du revêtement en acier hypereutectoïde ASM12, brut projection thermique et après des recuits à 600 et 800°C. Les essais sont réalisés sous une charge de 20N sur une distance de glissement de 5 Km. Les barrettes sur chaque histogramme indiquent la valeur maximale et la valeur minimale obtenues sur six essais	34
Figure III-8. Variation de la température en fonction du temps	36

Figure III-9. Evolution du coefficient de frottement du revêtement traité à 600°C. Charge 5N, distance de glissement 28.3 sous une vitesse de glissement de 1.57 cm/s. Tu indique le taux d'usure en mm³/m.....36

Figure III-10. Evolution du coefficient de frottement du revêtement traité à 800°C. Charge 5N, distance de glissement 28.3 sous une vitesse de glissement de 1.57 cm/s. Tu indique le taux d'usure en mm³/m.....36

Liste des tableaux

Tableau I-1. Différents types d'usure.	3
Tableau I-2. Principales caractéristiques des procédés de projection thermique.....	8
Tableau II-1. Les principaux éléments de la composition chimique de l'acier A60.	19
Tableau II-2 : Composition chimique de fil de projection.	19
Tableau II-3. Paramètres de projection utilisée par l'entreprise SNC ATRA.	22

Introduction Générale

Introduction générale

La demande industrielle pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure des pièces, tant mécanique que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans. Elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de l'usure. Dans les applications mécaniques, par exemple 30 % des causes d'avarie sont due à l'usure. Dans ce contexte, la stratégie industrielle est souvent de recourir aux revêtements pour améliorer les performances et allonger la durée de vie d'un système mécanique. Ces revêtements sont techniquement et/ou économiquement avantageux par rapport à un changement du matériau constituant la pièce à améliorer. En outre, il est demandé de plus en plus fréquemment aux pièces de résister à des sollicitations impliquant simultanément plusieurs phénomènes (frottement, abrasion, corrosion, chocs, ...).

La projection thermique, est une technique d'élaboration de revêtements, confère à chaque zone d'une pièce mécanique la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœur recherchées. Quelle que soit la fonction du revêtement, la morphologie de l'interface qui conditionne l'adhérence au substrat et la microstructure du dépôt sont les deux paramètres fondamentaux de la tenue en service. Dans le cadre de la rénovation des composants mécaniques usés (ramener à la côte d'origine les parties usées tout en assurant une meilleure résistance à l'usure) tels que les paliers et manetons de Vilebrequins, tourillons en milieu abrasif, arbre de pont arrière, portées de roulements, corps de compresseurs, arbre de pompes et rouleaux de broyeurs, l'entreprise SNC ATRA de Bejaia (Algérie) adopte comme dépôt métallique un acier hypereutectoïde faiblement allié au chrome, manganèse et silicium. Ce travail porte sur une caractérisation structurale par diffraction des rayons X (DRX) des constituants formant la microstructure de l'acier 100Cr6 après projection thermique par le procédé flamme fil suivi de recuits aux températures de 600 et 800°C. Ce choix de ces deux températures considéré comme recuit à moyenne température (600°C) et recuit à haute température (800°C) est motivé pour examiner les conséquences sur les propriétés tribologiques (tenue à l'usure et coefficient de frottement) et corroboré ces résultats avec ceux d'un recuit à basse température (300°C).

Ce travail comporte trois chapitres

Le chapitre I rassemble une revue bibliographique sur le phénomène d'usure et ses différents types, la technique de projection thermique dans l'élaboration des revêtements, l'influence des paramètres de projection sur les caractéristiques du dépôt, ainsi que les différentes méthodes pour améliorer la qualité de ses revêtements.

Le chapitre II présente le matériau du substrat, le métal d'apport sous forme de fil utilisé dans l'élaboration des revêtements, les différentes techniques expérimentales mises en œuvre pour réaliser les différentes caractérisations.

Le chapitre III rassemble les résultats obtenus et leurs discussions et leurs corroborations avec des résultats de travaux antérieurs.

Chapitre I

Synthèse Bibliographie

I-1 Introduction

En industrie la dégradation des surfaces par usure est un vrai problème, les dommages prévenant directement ou indirectement de ce phénomène sont considérablement élevée notamment dans l'industrie mécanique.

Les pièces qui subissent cette dégradation mécanique de surface seront envoyées au rebut, ce qui revient très chère pour les entreprises, ce qui impose aux experts du domaine d'accorder un intérêt particulier aux techniques de rénovation des pièces usées, puisque les industriels ne peuvent pas se permettre un remplacement périodique des pièces déterminants pour le bon fonctionnement de leur machine, par rapport à leur prix exorbitant.

Pour remédier à ce genre de dégradation on distingue la projection thermique qui a pour objectif la mise en place des couches superficielles procurant ainsi des propriétés intéressantes, ou encore la remise en côte des pièces usées plus communément appeler rechargement, ses revêtements sont obtenus par un empilement de particules accélérées à grande vitesse et chauffées à des températures assez élevées. Cette technique de rechargement par projection thermique offre ainsi l'opportunité de réaliser sur des pièces mécaniques, des revêtements métalliques diversifiés pour la qualité optimale de leur surface fonctionnelle : une grande dureté, une bonne résistance à l'usure, une bonne tenue à l'oxydation et à la corrosion.

I-2 L'origine de l'usure

L'usure est un phénomène résultant de l'endommagement des surfaces en contact animés par un mouvement relatif, associé à un frottement souvent élevé qui par conséquences amène à une émission des débris avec perte de masse, de cote, de formes. Il existe diverses origines de ce phénomène [5].

Origine mécanique : les effets fréquemment rencontrés sur les mécanismes

- Déformation plastique : évolution de dureté, changement microstructural, création et/ déplacement de dislocations, cisaillement, rayures, impacts...
- Modification des contraintes macroscopiques, souvent diminution (rodage des surfaces par arasement des points durs).
- Initiation et propagation de fissures.

Origine chimique : les effets fréquemment rencontrés sur les mécanismes

- Changement de composition chimique.
- Réactions chimiques, oxydation...

Origine physique : les effets fréquemment rencontrés sur les mécanismes

- Transformation de phases,
- Transferts par adhésion.
- Evolution micro grippage, micro soudure...
- Transformation micro et macro-géométrique.

Origine thermique : les effets fréquemment rencontrés sur les mécanismes

- Evolution de la température, dilatation, fusion superficielle.

I-3 Différents types d'usure

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux et variés comme on peut le constater dans le tableau I-1. L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces [1].

Tableau I-1 : Différents types d'usure.

Forme d'usure	Manifestation	Circonstances d'apparition
Usure par abrasion	-perte de poids et ou de cote -rayures, repoussement de la matière (labourage) -provoquer une fracture, si le matériau n'est pas homogène.	-abrasion a deux corps : si les rugosité, défauts de surface, labourent ou abrasent l'antagoniste -abrasion a trois corps : des particules dures et pulvérulentes sont présentes à l'interface ; ces particules sont libres de mouvoir entre les surfaces ou sont enchâssées dans l'une d'entre elles
Usure par adhésion	-Des particules sont transférées d'un corps sur l'autre, si les matériaux sont de natures différentes, le transfert s'effectue préférentiellement du corps le plus tendre, ou le moins tenace, sur le corps le plus dur.	-Frottement donnant lieu à des liaisons (jusqu'à la soudure) dont la résistance mécanique est supérieure
Usure par fatigue des surfaces	-Piqûres, cavités, pouvant intéresser des profondeurs de plusieurs dixièmes de millimètres.	-Contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de chocs, ou de glissement en régime lubrifié.
Usure par corrosion	-Coloration des surfaces -Usure par abrasion avec perte de cote	-Ensembles mécaniques soumis à vibrations -Pièces soumises à des mouvements relatifs alternés de faible amplitude.

Face à ce problème, les industriels doivent trouver des solutions pour, d'une part, prévenir l'usure et, d'autre part, réparer les pièces endommagées. La projection thermique offre des réponses intéressantes à ces problèmes.

I-4 Qu'est que la projection thermique

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma) pour fondre un matériau d'apport ou le porter à l'état pâteux, puis le projeter sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon

ou de baguette est fondue totalement ou partiellement à l'aide d'une source de chaleur. Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur la surface à revêtir, formant un dépôt par empilement successifs. Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface. (Figure 1).

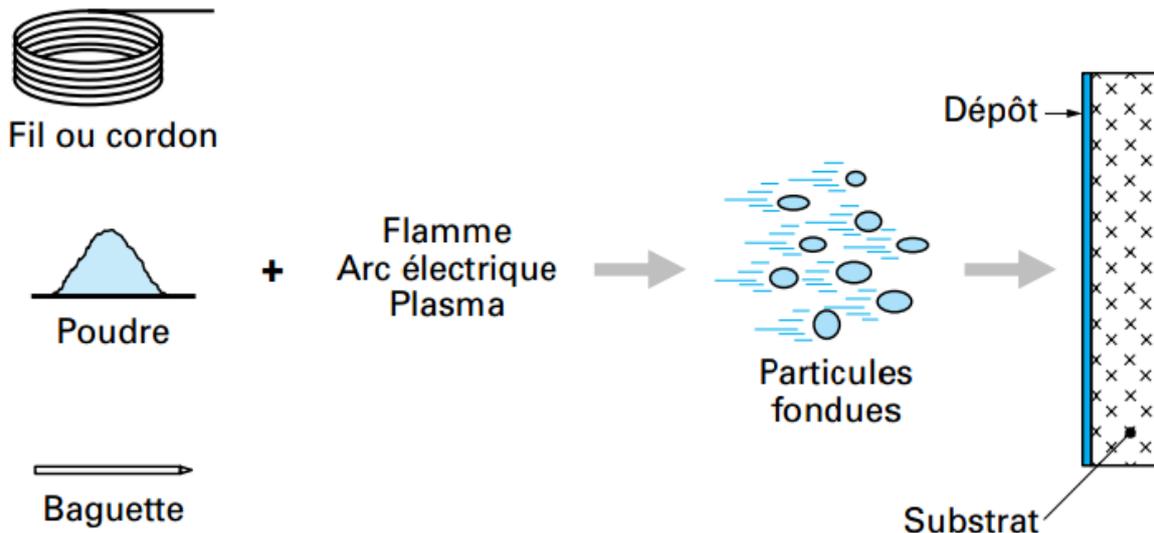


Figure I-1. Principe de la projection thermique [3].

I-5 Formation et structure des dépôts

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est de type lamellaire (figure I-2). L'utilisation de l'air comprimé dans la pulvérisation du métal fondu et sa projection vers la surface à revêtir provoque l'oxydation, en surface, des particules donnant lieu à la formation autour des lamelles solidifiées à des films d'oxydes. Par ailleurs, les réactions chimiques des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat (ou la couche précédemment déposée) affectent la qualité du dépôt par la formation de porosités dans le revêtement [2]. On rencontre très souvent dans la morphologie des revêtements des particules sphériques dénommées particules non fondues du fait qu'elles soient initialement à l'état non fondu (pâteux) à la sortie de la buse de la torche et continuent leur refroidissement en cours de leur envol avant leur impact avec la surface du substrat.

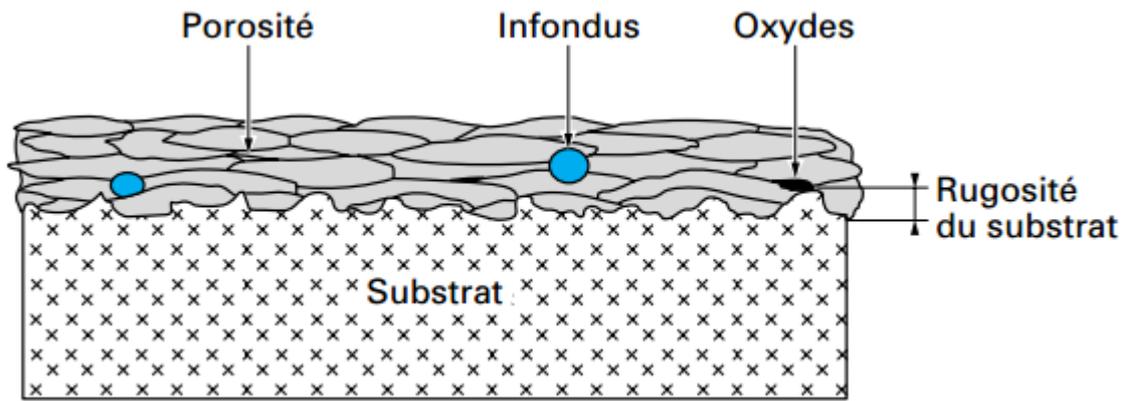


Figure I-2. Structure d'un dépôt obtenu par projection thermique [3].

I-6 Les différents procédés de projection thermique

Les techniques de projection thermique habituellement utilisées dans les petites entreprises pour rénover les surfaces usées de pièces mécaniques sont le procédé flamme-fil, flamme poudre et le procédé par arc électrique entre deux fils.

I-6-1 Projection à flamme

On désigne par la projection à flamme toute projection utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion d'un carburant avec l'oxygène. La température d'une flamme oxy-combustible varie de 2800°C à 3150°C. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, et qui ne subliment pas, peuvent être projetés. Il existe deux types de projection par flamme qui sont à flamme poudre et flamme fil [1].

I-6-1-1 Projection flamme-poudre

Le procédé de projection flamme poudre est le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible et à le véhiculer jusqu'au substrat grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion. Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C. La vitesse et la distance de tire sont deux paramètres à optimiser, à fin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 1 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat ($T < 250^\circ\text{C}$). Les taux de porosité varient de 10 à 20% avec un rendement moyen de 50 %. La force d'adhérence des dépôts au substrat est de 20 à 40 MPA.

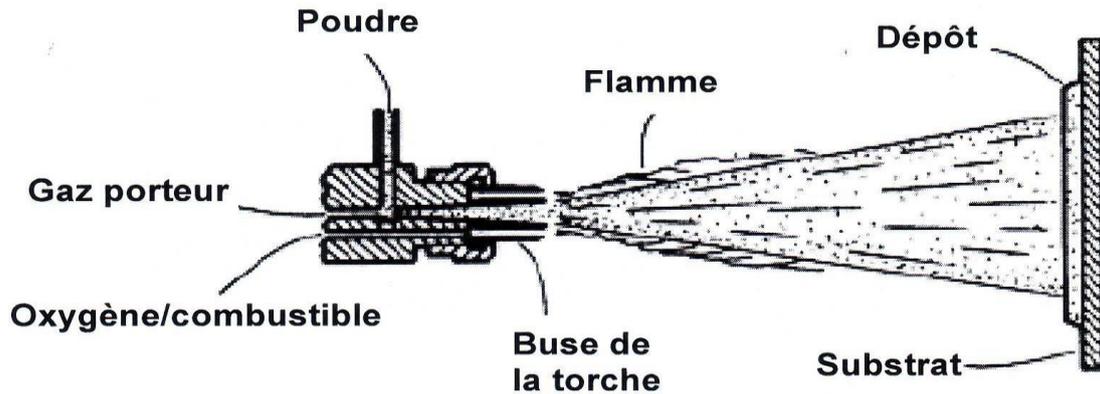


Figure I-3. Schéma illustrant la technique de projection thermique à flamme poudre [2].

Il existe différents distributeurs de cette poudre :

- Distributeur par gravité.
- Distributeur par pression.
- Distributeur par dépression.
- Distributeur par cyclone. (le mouvement tourbillonnaire qui met la poudre en suspension, est assuré par un courant d'air, qui permet de véhiculer celle-ci jusqu'au pistolet de projection).

I-6-1-2 Projection flamme fil

Cette technique consiste à introduire le matériau d'apport dans le centre de la flamme sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre et qui ne sert qu'à faire fondre le matériau. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, celui-ci sert à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée ($\sim 150\text{m/s}$), la température du bout de fil peut atteindre 0.95 fois la température de la flamme ce qui permet la projection de divers types de matériaux, à des taux horaires de dépôts qui varient de 1 à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, les propriétés de dépôts désirées et les diamètres de fil ou de baguettes utilisés [4].

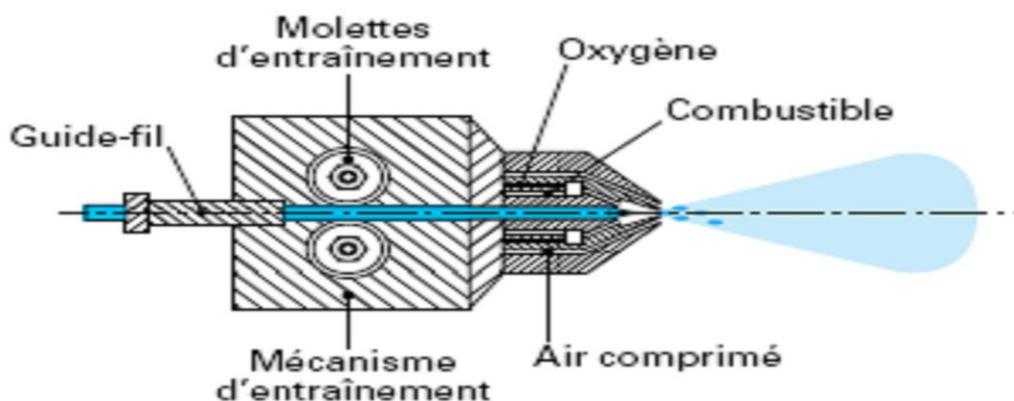


Figure I-4. Schéma illustrant le principe de la projection thermique à flamme fil [3].

I-6-1-3 Les gaz de projection [5]

Tous les procédés présentés précédemment utilisent une flamme oxy-combustible comme source de chaleur. Si l'oxygène est généralement utilisé comme comburant de préférence à l'air pour l'obtention de performances thermiques élevées, le choix des combustibles sera dicté par des paramètres de procédé (température de flamme, pression de travail), de coût, de stockage ou de sécurité.

Les principaux gaz combustibles sont l'acétylène (C_2H_2), le propylène (C_3H_6), des mélanges acétylène, éthylène, propylène. Des mélanges méthyles-acétylène propadiène (C_3H_4), hydrocarbures ou encore des hydrocarbures tels que le propane. L'ensemble des propriétés de différentes flammes sont liées à la structure moléculaire des combustibles utilisés.

L'acétylène possède des performances thermiques exceptionnelles, ce qui le rend le gaz le plus employé en projection flamme-fil. En revanche, son instabilité sous pression élevée ne permet pas son utilisation en projection hypersonique, ou dans la recherche d'amélioration de performances de pistolets flamme liée à une augmentation des pressions de travail.

Le choix du gaz combustible influencera directement sur le taux de dépôt, la qualité du revêtement (finesse du grain, cohésion...). Cette influence est due, d'une part, aux propriétés thermiques de chaque flamme et d'autre part à la matière et au contrôle de la régularité des débits et pressions qui peuvent découler du choix de gaz.

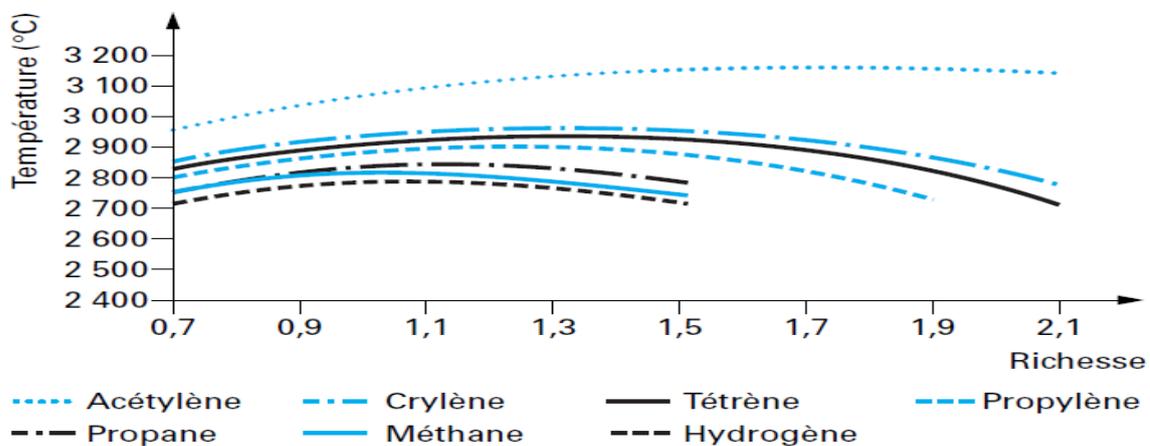


Figure I-5. Température de flamme oxy-combustible [3].

I-6-2 Projection par arc électrique entre deux fils [5]

Cette technique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux électrodes sous formes de fils ductiles consommables comme source de chaleur pour fondre le matériau. Celui-ci, réduit à l'état de gouttelettes, est pulvérisé sur le substrat par un jet d'air comprimé. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A. Ce procédé de projection est simple et économique mais limité aux matériaux conducteurs.

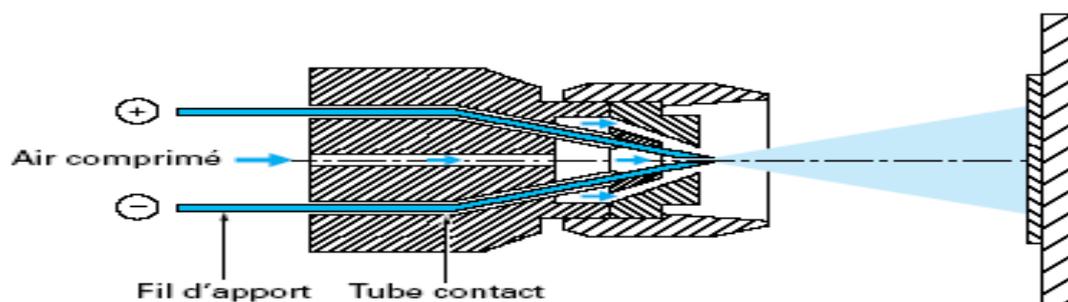


Figure I-6. Schéma illustrant la technique de projection thermique arc-fil [3].

I-7 Analyse comparative des procédés de projection thermique

Les différents procédés de projection sont caractérisés par deux paramètres fondamentaux qui influencent sur les caractéristiques du dépôt telles que sa densité et son adhérence, on trouve l'énergie thermique (température de la flamme °C) et l'énergie cinétique (vitesse de particules m/s).

Ce pendant d'autres caractéristiques importantes doivent être pris en compte pour comparer l'ensemble des procédés de projection thermique. Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques de chaque technique de projection.

Tableau I-2 : Principales caractéristiques des procédés de projection thermique [3].

Caractéristique	Projection flamme poudre	Projection flamme fil	Projection arc électrique
Source de chaleur	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Arc électrique
Température de flamme(C°)	3000	3000	6000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé
Vitesse des particules (m/s)	40	150	250
Forme de matériau d'apport	Poudre	Fil ou cordon	Fil
Rendement moyen (%)	50	70	80
Epaisseur (mm)	0.1 à 1.5	0.1 à 1.5	0.2 à 3

<p>Exemple de matériaux d'apport</p>	<ul style="list-style-type: none"> - métaux - céramiques - carbures dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> - métaux - céramiques - carbure dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> - métaux
---------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------

I-8 Différentes techniques de préparation de surface

L'état physico chimique de la surface du substrat a un rôle très important sur la formation des dépôts (structure des lamelles) du revêtement et donc sur son adhérence. Cette propriété est en effet un critère de qualité car elle assure le bon accrochage du revêtement au substrat.

Les techniques de préparation « mécaniques » sont les plus utilisées en projection thermique, elles sont également les plus simples à mettre en œuvre. La plus utilisée est un jet de particules abrasives (grenailage) qui impactent la pièce à revêtir et l'érodent en augmentant la rugosité de surface à revêtir [6]. Ce jet abrasif permet également l'élimination des contaminations de surface ainsi que de la couche d'oxyde. Les grains utilisés ont des diamètres généralement compris entre 400 μm et 1400 μm et peuvent créer une rugosité de surface dépassant des rugosités Ra de l'ordre de 10 μm . **Cependant, il est nécessaire de prendre des précautions car la projection à haute pression d'un matériau dur peut induire des inclusions dans le substrat qui nuiront à l'adhérence. Une étape de nettoyage par ultrasons est donc souvent utilisée après le sablage ou le grenailage et avant la projection [5].**

I-8-1 Dégraissages

Ce que l'on cherche à éliminer dans cette opération, ce sont des graisses incrustées sur le substrat. Il s'effectue soit par dissolution en milieu de solvant organique, soit par saponification et soit par muséification à l'aide d'un tensioactif. Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse de même un effet mécanique est souvent nécessaire.

I-8-2 Décapage

Le nom générique du décapage regroupe les procédés éliminant les couches d'oxydes anhydres formées en haute température alors que le dérouillage concerne les oxydes hydratés de la corrosion naturelle. Les méthodes de décapage sont chimiques, électrochimique, mécanique ou thermique. Les méthodes chimique et électrochimique utilisent des solutions agressives acides ou alcalines ou encore des oxydants forts.

Dans la plupart des cas une mauvaise préparation de surface est à l'origine d'un traitement de surface défaillant. La qualité d'une préparation est une notion relative selon les utilisations, ni les éléments gênant ni leur teneur limite ne sont les mêmes.

I-8-3 Sablage

Le sablage est le terme impropre donné au « traitement par impact », plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement de surface, par des projectiles petits et nombreux, destiné à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au subjectile. La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une force centrifuge (turbine) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles). Le grenailage met en œuvre des projectiles extrêmement variés dans le but :

- D'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.
- De créer un maximum d'aspérités, ou le matériau déposé s'ancre dans ses irrégularités de surface.

I-8-4 Préchauffage

Suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle de support, on obtiendra un accrochage plus au moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé à fin d'augmenter l'énergie d'adhérence. Est indispensable pour certains types de matériaux [7].

I-9 Caractéristiques générales des revêtements

I-9-1 Structure métallurgique

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermé pendant la solidification [8].

Les taux de porosité varient de moins 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés.

Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux prévenant de chalumeaux eux-mêmes, des particules non fondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur), comme schématisés par la figure I-7.

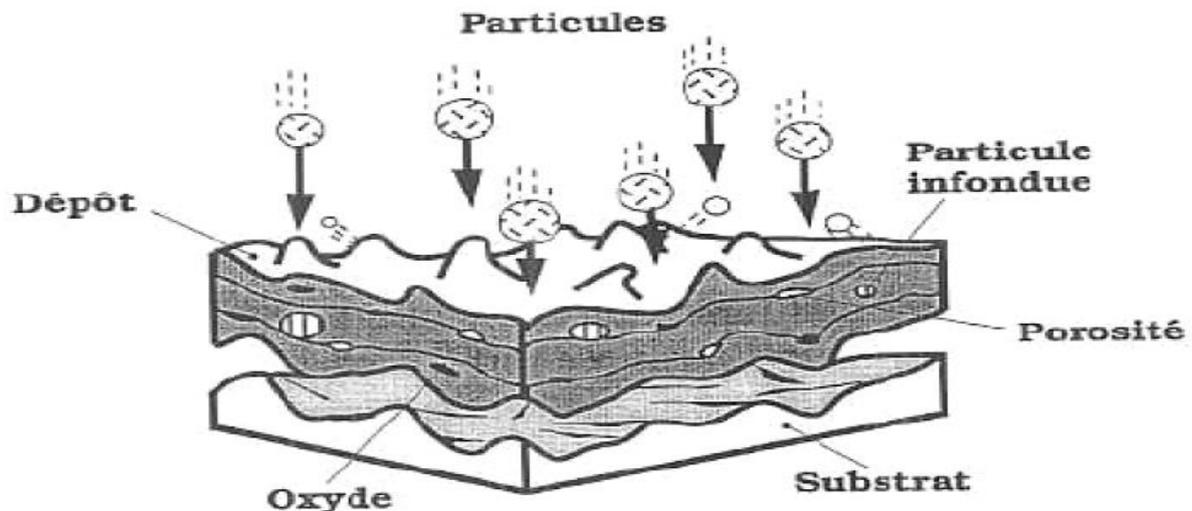


Figure I-7. Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique [9].

I-9-2 La porosité et l'oxydation [7]

Les particules métalliques en fusion, s'oxydent sur leur trajet de la buse au support. Même si la distance est courte, de 150 à 200 mm et que la durée du parcours n'est que 1 millième de seconde, elles subissent l'action chimique des gaz environnant (air mélangé au gaz de combustion). Ceci entraîne une baisse de densité du dépôt de 10% environ par rapport au matériau projeté

Cette oxydation est inévitable puisque l'utilisation de l'air comprimé comme un gaz d'atomisation du métal fondu en fines gouttelettes et leur projection sur la surface à revêtir étant obligatoire, ce qui impose d'optimiser la pression et le débit de l'air comprimé pour minimiser le taux de formation d'oxydes. Ce phénomène qui est mis en jeu en projection thermique peut intervenir à différents stades du procédé :

Oxydation des gouttelettes en vol, la quantité d'oxygène présente dans le jet provient de gaz d'atomisation s'il s'agit d'un gaz oxydant comme l'air, mais aussi de l'entraînement de l'air ambiant à la sortie de la tuyère. Cette oxydation des particules en vol est liée à deux mécanismes :

- La diffusion de l'oxygène dans les gouttelettes fondues.
- Les mouvements de convection induits au sein de la gouttelette liquide par l'écoulement du gaz d'atomisation. Ces mouvements entraînent de l'oxygène et des oxydes vers le centre de la gouttelette. Ce phénomène est donc favorisé par des vitesses de gaz d'atomisation élevées.

Oxydation lors de la formation du dépôt : il existe deux types d'oxydations :

- L'oxydation des lamelles : elle est généralement peu importante car les lamelles ne sont pas soumises à l'air ambiant que pendant quelques microsecondes, avant qu'elles ne soient recouvertes par d'autres lamelles.

- L'oxydation entre deux passes successives : elle peut être non négligeable puisqu'il peut s'écouler quelques secondes à quelques heures entre deux passes successives suivant la taille de la pièce et la vitesse pistolet-substrat.

. Cette porosité peut être un avantage dans le cas d'un rechargement de surface, puisqu'elle crée des rétentions possibles pour l'absorption d'un lubrifiant souvent bénéfique en mécanique.

Par contre, elle devient néfaste en protection de surface, ou manque de compacité, est un inconvénient pour l'étanchéité du revêtement.

La porosité à des influences néfaste sur les propriétés mécaniques des revêtements :

- Diminution de la dureté et de la résistance à la traction.
- Chute de module de Young
- Aide à la diffusion d'oxygène donc à l'oxydation de l'interface.
- Initiation de fissures à cause des concentrations de contrainte au voisinage des pores.

I-9-3 Adhérence

Sa définition comme une propriété d'un revêtement à supporter un champ de contraintes sans se désolidariser de son substrat.

Parmi les paramètres qui mesurent la fiabilité d'un revêtement on trouve l'énergie d'adhérence entre le substrat et les couches préalablement déposées. Cette adhérence est essentiellement de type mécanique. Le matériau d'apport est projeté sur substrat il va s'ancrer dans les irrégularités de surfaces pour augmenter la surface de contact, et formation de microsoudures, ce qui donne une grande énergie d'adhésion.

Elle est mesurable par l'essai de flexion à 4 ou 3 points.

I-9-4 La densité

Les particules de projection **en contact** de l'air sont **porouse**, cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection utilisé. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité de revêtement. Pour les revêtements métalliques cette dernière est également en fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection.

I-9-4 La dureté

Les particules sont soumises à un martelage dû aux impacts des suivantes, ce qui entraîne un phénomène d'écrouissage. Elles sont aussi soumises à un phénomène de trempe, lié à leur trajet et à la température du support. En un très court, la température d'un acier projeté à 1500°C, chute rapidement à 100°C, température maximale de la pièce en traitement.

La dureté est une propriété significative parce qu'elle donne une indication de la résistance à l'usure abrasive. Elle est affectée par la teneur en oxydes et la porosité du dépôt. Une teneur en oxydes plus élevée conduit à une dureté plus élevée. L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt [7].

I-9-5 contraintes résiduelles

On définit les contraintes résiduelles comme étant les contraintes demeurant dans une structure mécanique alors qu'aucune sollicitation extérieure n'est appliquée.

Elles ont une double origine : contraintes de dilatation différentielle dues à la différence de coefficient de dilatation entre le revêtement et le substrat au cours de refroidissement, et des contraintes intrinsèque, **qui** sont due au procédé d'élaboration des revêtements et **qui** apparaissent durant la croissance. On peut parfois trouver leurs origines et tenter de les réduire. Dans certains cas, un recuit ou des cycles thermiques permettent de les relaxer.

Un refroidissement très rapide provoque une contraction. Cette contraction est accompagnée par l'apparition de contraintes de trempe, ce qui induit l'apparition de certaines phases intermédiaires métastables.

Plus le revêtement est épais plus les contraintes augmentent, à l'atteinte d'une certaine épaisseur ces contraintes dépassent les contraintes d'adhérence du revêtement créant un délaminage. Ces contraintes dépendent fortement du mode de projection ainsi que des matériaux projetés. Pour remédier à ce phénomène, la réduction du gradient de température est indispensable, par un préchauffage avant la projection et un maintien du revêtement à une température basse [8,9].

I-10 paramètres influençant sur la qualité des revêtements

I-10-1 Pression et débits des gaz

Le gaz d'atomisation a pour fonction la formation des gouttelettes initiales et leur accélération jusqu'au substrat. Ce gaz, en général de l'air, atomise sous la partie fondue sous forme de fine gouttelettes et les projette sur la surface du substrat. Les propriétés des dépôts dépendent en grande partie de la nature et de la pression du gaz d'atomisation.

En général, des pressions d'atomisation élevées conduisent à des lamelles moins épaisses et une densité de dépôt plus élevée, parce que des particules plus fines ($< 30\mu\text{m}$) atteignent des vitesses plus élevées ($>100\text{m/s}$). Pour la même raison, des pressions d'atomisation plus élevées ($>0.4\text{Mpa}$) entraînent une diminution de la rugosité du dépôt et généralement une meilleure cohésion de celui-ci et une meilleure adhérence au substrat.

Cependant une augmentation de la pression d'atomisation peut avoir un effet néfaste sur la qualité du dépôt. En effet, lorsque les particules atteignent une vitesse trop importante ($>100\text{m/s}$), ce qui arrive pour des pressions élevées, elle « explosent » au contact de substrat et cela se traduit par une diminution du rendement de projection.

I-10-2 Distance de projection

Cette distance de projection a une influence directe sur les caractéristiques des dépôts tels que la porosité, l'adhérence. Cette distance de tir, qui est définie comme la distance séparant la buse du pistolet de la surface à revêtir, ne doit être ni trop grande ni trop petite.

Une distance courte peut entraîner la surchauffe du substrat ce qui peut provoquer des contraintes thermiques causant ainsi le délaminage du dépôt. Par contre, si la distance de projection est trop grande, les particules se solidifient avec l'impact et rebondissent au contact de la cible, ce qui nuit à la qualité du dépôt. Cette distance varie de 60 à 250 mm selon le mode de projection employé.

I-10-3 Angle de projection

L'angle de projection est généralement droit (90°). Dans ce cas, le dépôt s'accroche normalement et est homogène. Si l'angle est inférieur à 45° , la porosité augmente et la cohésion des particules entre elles également.

I-10-4 Vitesse relative pistolet-substrat

La vitesse de déplacement transversal du pistolet conditionne l'épaisseur et donc le refroidissement de la couche déposée. Une vitesse trop lente peut causer un échauffement. Une vitesse trop rapide peut aboutir à une épaisseur de passe trop fine.

En projection thermique, l'épaisseur déposée par passe est un facteur primordial dans la tenue en service des dépôts. En effet, une épaisseur par passe trop importante peut conduire à un gradient de température élevé entre les deux faces de la couche déposée et à la formation de fissures horizontales entre les passes consécutives conduit au développement de contraintes résiduelles. Ces fissures peuvent être responsables de la décohésion du dépôt en cours d'usage.

I-11 Fiabilité des revêtements

La fiabilité du revêtement repose sur trois paramètres fondamentaux :

- La meilleure adhérence possible avec le substrat, elle est quantifiée en termes d'énergie d'adhésion.
- La meilleure tenue à l'usure.
- Un coefficient de frottement approprié.

Ses deux derniers paramètres représentent les propriétés tribologiques. A ce titre il y a lieu de rappeler que :

- Le frottement caractérise la résistance aux mouvements.
- L'usure résulte de l'ensemble des processus de destruction des surfaces.

Le frottement et l'usure sont deux phénomènes dissipatifs aux interfaces : le frottement consomme de l'énergie, l'usure consomme de la matière.

I-12 Travaux antérieurs sur les revêtements en acier

Les dépôts en alliage à base de fer obtenus par la technique de projection thermique jouent un rôle primordial dans la conception et la réparation des pièces et les surfaces qui subissent le phénomène de l'usure, ses dépôts sont très utilisés dans l'industrie automobile.

Edrisy et col [10]. Ont étudié le comportement à l'usure à sec d'un revêtement en acier hypoeutectoïde à bas carbone (0.2%C) déposé sur un substrat en aluminium. Le revêtement est constitué essentiellement de la phase Fe- α (cubique centrée) et d'oxyde FeO cubique à face centrée.

Pour le même revêtement en acier hypoeutectoïde à bas carbone, Edrisy et Alpas [11], ont examiné l'influence de l'addition de l'aluminium (2,5%) sur la résistance à l'usure. Dans les deux types de revêtements, les phases présentes concernent la phase α -Fe cubique centré et l'oxyde FeO cubique à faces centrées. L'addition de 2,5% d'aluminium fait diminuer sensiblement la fraction volumique de FeO (15%). La résistance à l'usure est sensiblement améliorée pour le revêtement en acier à bas carbone à qui on a additionné 2,5% d'aluminium.

Chen et col [12]. Ont étudié l'influence de l'aluminium sur la microstructure d'un revêtement en acier eutectoïde (0.8%C), le revêtement est élaboré par le procédé à arc électrique entre deux fils (co-projection d'un fil en acier à 0.8%C et un fil en aluminium). Une caractérisation

par DRX révèle la présence des pics d'aluminium pur, des phases Fe- α , Fe- γ et d'oxyde FeO, lorsque ce revêtement sera suivi d'un recuit à partir de 450°C la phase Fe- γ transforme complètement en phase Fe- α , et l'oxyde FeO en Fe₃O₄. Un recuit à 550°C développe la phase intermétallique Fe₂Al₅, au côté de l'oxyde Fe₃O₄ et la phase Fe- α . Avec un recuit de 650°C, le revêtement est composé essentiellement de la phase Fe- α de l'oxyde FeO et des intermétalliques Fe₂Al₅, Fe₃Al, FeAl. Cette dernière microstructure est hétérogène dans le brut de projection.

Belamri a étudié l'effet de recuit aux températures 200, 300 et 450°C sur la microstructure, la tribologie et l'adhésion d'un revêtement en acier hypereutectoïde (1%C) faiblement allié au Cr-Mn-Si [13,14]. Une identification de phase par DRX de brut de projection révèle que ce revêtement est quadriphasée deux phases métalliques (ferrite α et austénite γ) et deux phases d'oxyde (FeO et Fe₃O₄). Après le recuit à 200°C il y a une transformation complète de la phase austénite γ en phase ferrite α , et les deux oxydes sont stables au cours de traitement de recuit. Cependant avec l'augmentation de la température de recuit, la fraction de l'oxyde Fe₃O₄ augmente au détriment d'une diminution de fraction de FeO. Une analyse de micro-dureté sous faible charge (50g) montre que les oxydes sont plus durs dans ses revêtements.

L'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour le revêtement brut de projection et le revêtement recuit à 300°C est tout à fait différente (Figure I-8).

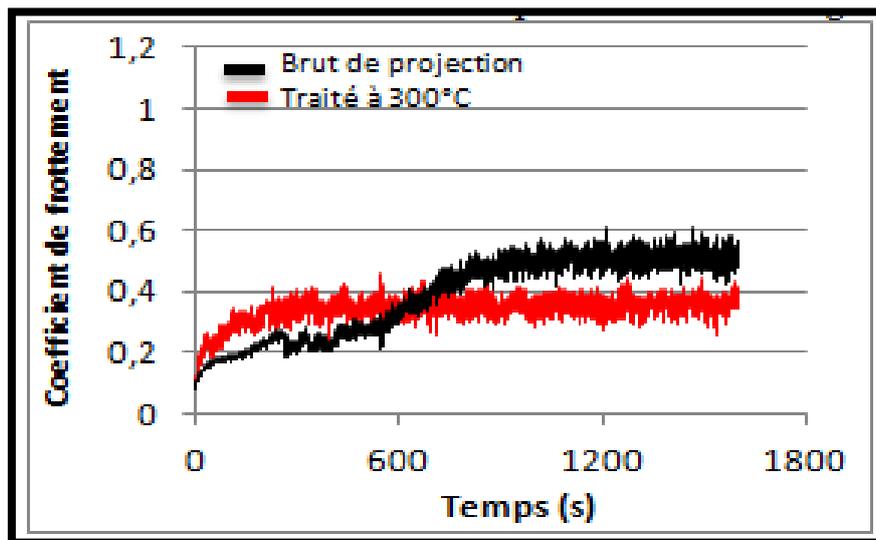


Figure I-8. Evolution du coefficient de frottement des revêtements brut de projection thermique et recuit à 300°C/90mn. La charge utilisée est de 5N. La distance de glissement total est de 750 m [13,14].

Le revêtement après recuit à 300°C développe un palier unique situé entre le palier inférieur et le palier supérieur du revêtement brut de projection thermique. Pour comprendre cette différence des résultats sur ces deux coefficients de frottement pour les deux types de revêtements, Belamri et col. ont mené une caractérisation fine et cohérente des surfaces d'usure en utilisant la microscopie électronique à balayage (MEB). Pour le revêtement brut de projection, la première étape débute par la déformation plastique des phases métalliques donnant lieu à des détachements de petites particules fines qui vont progressivement s'agglutiner dans la phase oxyde Fe₃O₄. Ceci

donnera lieu à la présence de larges zones compactes d'oxyde Fe_3O_4 incrustées de particules métalliques dures (Figure I-9). Ces zones considérées comme milieu biphasé peuvent donc changer le régime de l'usure puisque il y a un corps dur qui intervient et qui va user non seulement les deux oxydes mais aussi la phase métallique elle-même. Ceci pourrait expliquer l'augmentation du coefficient de frottement d'un premier palier autour de la valeur 0,25 vers un nouveau palier autour d'une valeur de 0,52 (cf. Figure I-8).

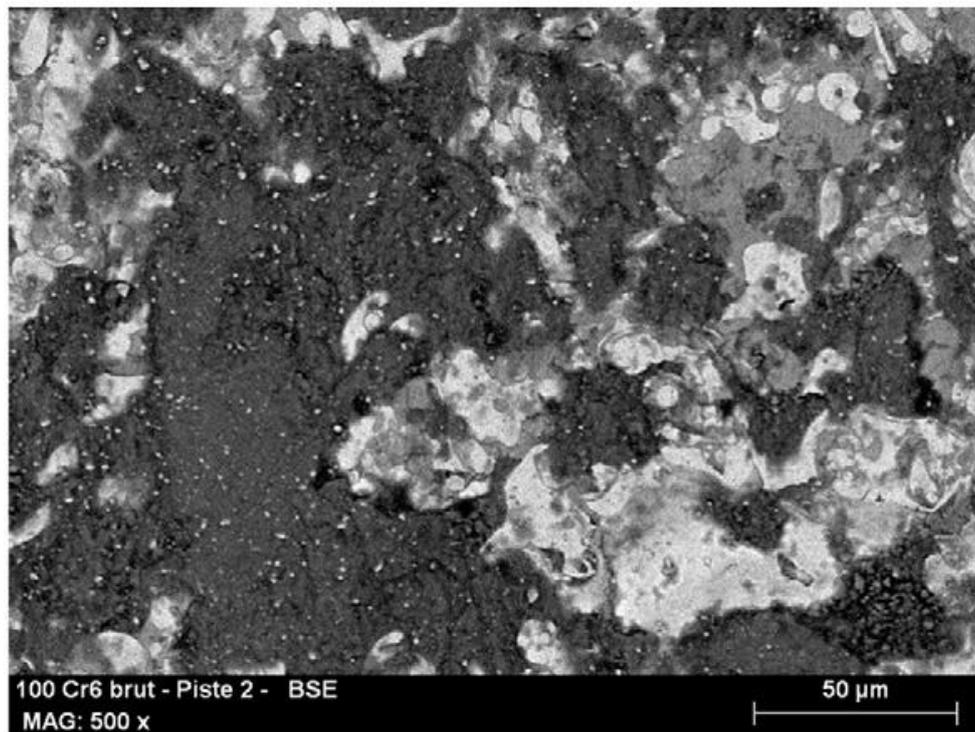


Figure I-9. Micrographie électronique à balayage de la piste d'usure du revêtement en acier hypereutectoïde brut de projection thermique mettant en évidence une distribution de petites particules de la phase métallique qui s'incrustent dans la magnétite Fe_3O_4 . Image en mode rétrodiffusés [14].

Pour le revêtement recuit, contrairement au revêtement brut de projection, l'oxyde Fe_3O_4 paraît moins compact et plus poreux avec une très rare présence de particules métalliques (figure I-10).

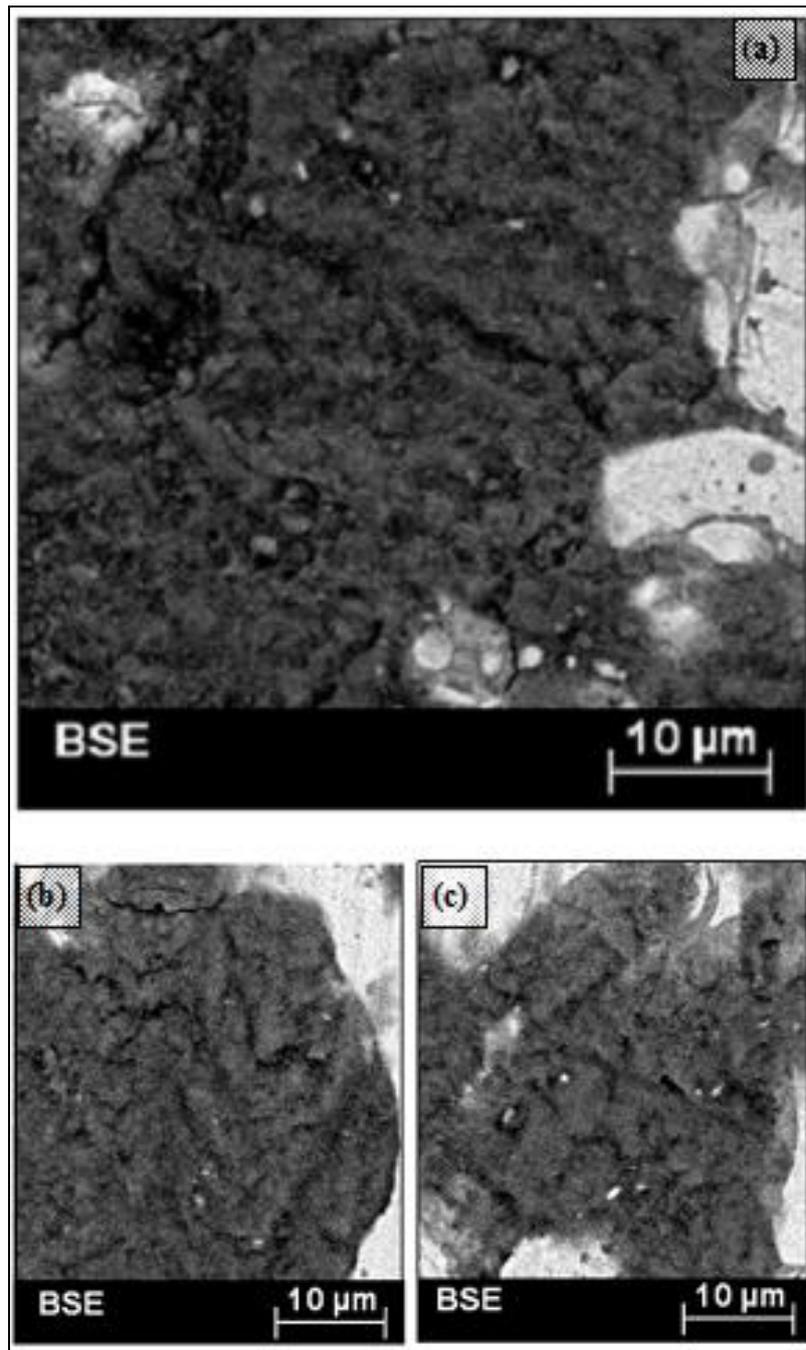


Figure I-10. Micrographies électroniques à balayage (Image en mode électrons rétrodiffusés) sur trois zones de la piste d'usure du revêtement en acier hypereutectoïde recuit à 300°C. On distingue clairement l'aspect poreux de la magnétite Fe_3O_4 [14].

L'aspect poreux de l'oxyde Fe_3O_4 , en cours de frottement va progressivement s'étaler pour couvrir progressivement la phase métallique ferrite α comme illustré sur la figure I-11. Ceci est perceptible au regard de la zone encadrée au trait blanc sur la micrographie qui met en évidence un front de propagation de l'oxyde Fe_3O_4 sur la phase métallique.

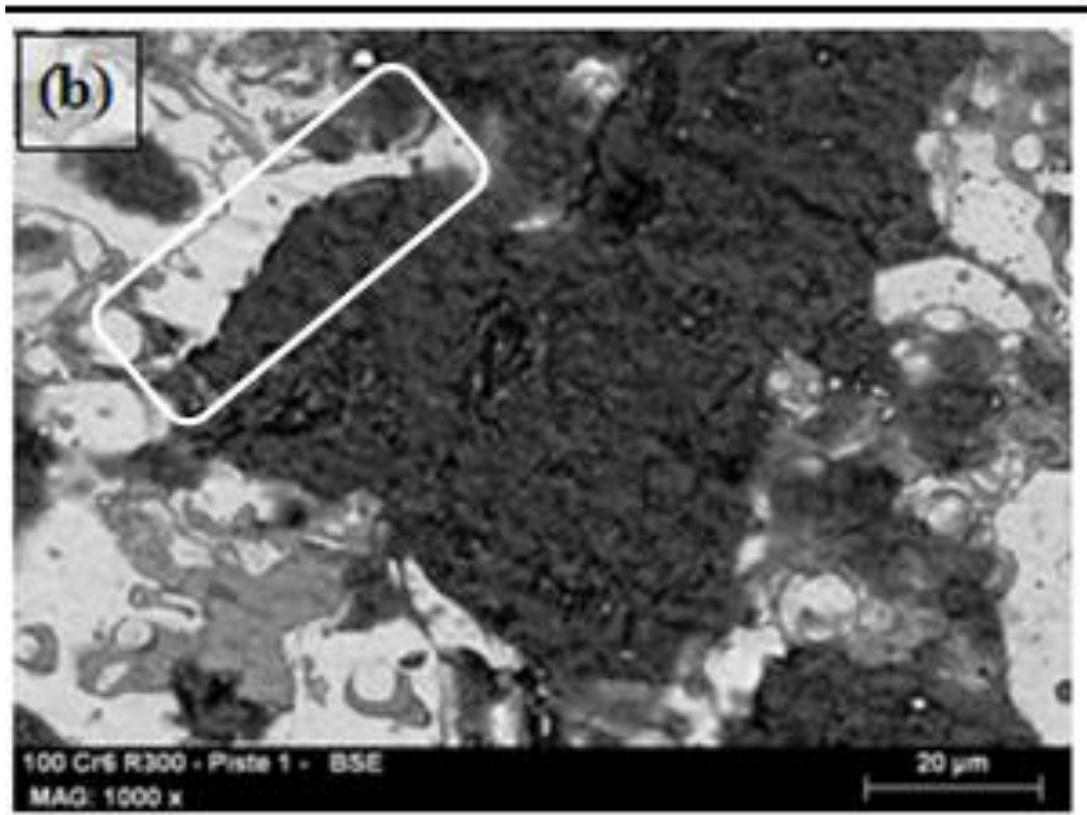


Figure I-11. Micrographies électroniques à balayage d'une zone du cœur de la piste d'usure du revêtement en acier hypereutectoïde recuit à 300°C. Mise en évidence sur la zone encadrée d'un front de propagation de l'oxyde poreux Fe_3O_4 s'étalant sur la phase métallique en blanc [14].

Pour les auteurs, cet état de fait suggère que la magnétite friable en quantité plus importante que dans le revêtement brut de projection joue le rôle d'un lubrifiant solide. En s'usant plus facilement, elle va développer plus de particules qui s'étaleront progressivement sur la phase métallique. Ceci expliquerait probablement pourquoi le revêtement recuit à 300°C développe un palier unique du coefficient de frottement avec une valeur nettement plus basse que celle obtenue dans le palier supérieure concernant le revêtement brut de projection thermique.

Chapitre II

Matériaux et Techniques Expérimentales

II-1 Introduction

Ce chapitre décrit les moyens et les méthodes utilisées pour réaliser sur un substrat en acier type A60 un revêtement par projection thermique. Le métal d'apport sous forme de fil est un acier hypereutectoïde ASM12, faiblement allié au Cr-Mn-Si. Le revêtement est élaboré chez l'entreprise SNC ATRA de Bejaia en utilisant le procédé flamme-fil. Au regard des travaux de Belamri, nous avons réalisé sur le revêtement brut de projection thermique des recuits de 90 mn aux températures de 600°C et 800°C. Une caractérisation microstructurale basé sur l'observation métallographique en utilisant un microscope optique, a été également effectuée pour voir la microstructure et la morphologie des dépôts, ainsi qu'une des phases par diffraction des rayons X (DRX). Les différents revêtements sont soumis par la suite aux tests d'usure dans une configuration pion stationnaire-disque rotatif sous une charge de 20 N avec une vitesse 110 m/s pendant 45 mn (distance 5 Km) pour évaluer la perte de masse, ainsi qu'une mesure de la température chaque 5 minute durant la période de test. Une mesure de micro-dureté sous une charge de 500g. La dernière étape de caractérisation concerne la détermination des coefficients de frottement et du taux d'usure.

II-2 Matériaux utilisés

II-2-1 Le substrat

Le substrat utilisé pour réaliser des dépôts est un acier de type A60, ancien désignation AFNOR et dans la nouvelle désignation NF EN 1027-1 est E335. Est un acier à usage courant type hypoeutectoïde. Non traité, offre une bonne résistance mécanique (R_m) est 590~ 770 N/mm². Sa limite d'élasticité est 305~335 N/mm² avec un allongement qui est égale 6~16 %. Sa composition chimique (poids %) est illustré sur le tableau II-1

Tableau II-1 : les principaux éléments de la composition chimique de l'acier A60 [2].

Éléments	C	Mn	Si	P	S
E335	0.23	1.17	0.6	0.055	0.055

II-2-2 Matériau d'apport

Le matériau de projection utilisé est un acier faiblement allié Cr-Mn-Si à haute teneur en carbone (1%C) hypereutectoïde connu sous un nom commercial ASM12, qui se présente sous forme de fil fourré diamètre 3.5 mm.

Tableau II-2 : Composition chimique de fil de projection.

Métal	C	Cr	Mn	Si	Mo	Fe
ASM12	1.03	1.00	0.6	0.30		Bal

II-3 Elaboration des échantillons

II-3-1 Première configuration

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur un tour parallèle au niveau du hall de technologie où j'ai effectué :

- Un dressage, pour avoir un bon état de surface.
- Un épaulement, dans le but de la fixation lors de la projection.
- Un surfaçage de la petite section sur laquelle une vis s'appuie pour assurer que cet échantillon ne bouge pas lors des essais.

Les échantillons sont élaborés sous la forme présentée dans la figure ci-dessous, sont destinés pour l'essai d'usure.

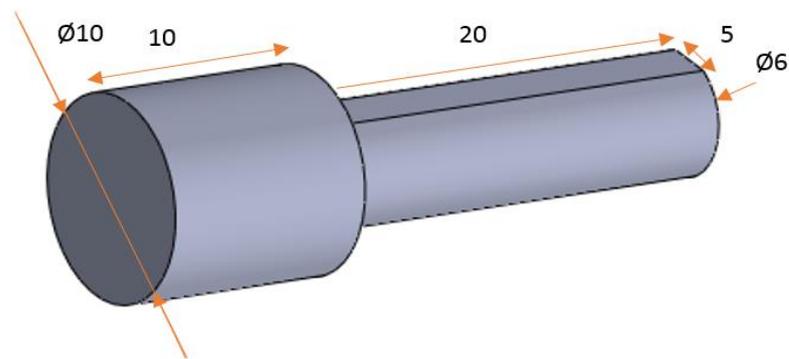


Figure II-1 . Schéma du pion en acier A60 destiné pour essais d'usure.

II-3-2 deuxième configuration

Sont des plaques rectangulaires 30x25x5, Ses plaques sont destinées pour la micrographie, la mesure de micro dureté ainsi que la détermination du coefficient de frottement.

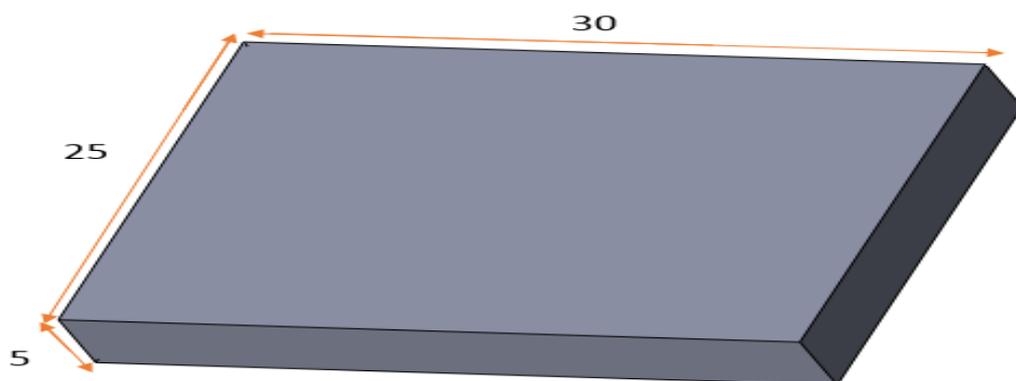


Figure II-2 . Schéma d'un substrat en acier A60 destiné au pour la micrographie, l'essai de dureté et le coefficient de frottement.

II-4 Préparation de surfaces à revêtir

Après avoir élaboré les échantillons, on a effectué les différentes opérations de préparations de la surface à revêtir selon les étapes suivantes :

II-4-1 Dégraissage

Ce traitement est d'importance capital, dans le but d'éliminer sur la surface toutes traces de substances organiques, huiles, produit gras, pâtes qui sont dues aux différentes manipulations que le matériau a subies auparavant. Les échantillons sont dégraissés et nettoyé avec de l'éthanol.

II-4-2 Sablage (Grenailage)

Pour créer des surfaces rugueuses prêtes à recevoir le revêtement, on a opté pour le sablage avec du corindon. Le principe de sablage consiste à cibler la surface à revêtir par un jet de particules à une pression d'air de 5 bars. Ce prétraitement offre l'avantage simultané de donner à la surface une bonne rugosité donne une bonne adhérence physique et mécanique.

Après l'opération du sablage, les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec l'éthanol afin d'éliminer les souillures.

II-5 Réalisation de dépôt

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de respecter certaines étapes telles que la bonne usinabilité des échantillons, qui se représentent sous une forme bien déterminée (voir la représentation des échantillons élaborés) et une préparation de la surface à savoir le sablage ainsi les paramètres de projection.

II-5-1 Paramètres de projection du procédé à flamme fil (Entreprise SNC ATRA)

Les différents dépôts ont été obtenus à l'aide d'un pistolet à flamme fil oxy-gaz de type MARK 60 figure II-3 elle montre l'installation de projection, les revêtements sont obtenus selon les paramètres de projection utilisée par l'entreprise, ils sont résumés dans le tableau ci-dessous :

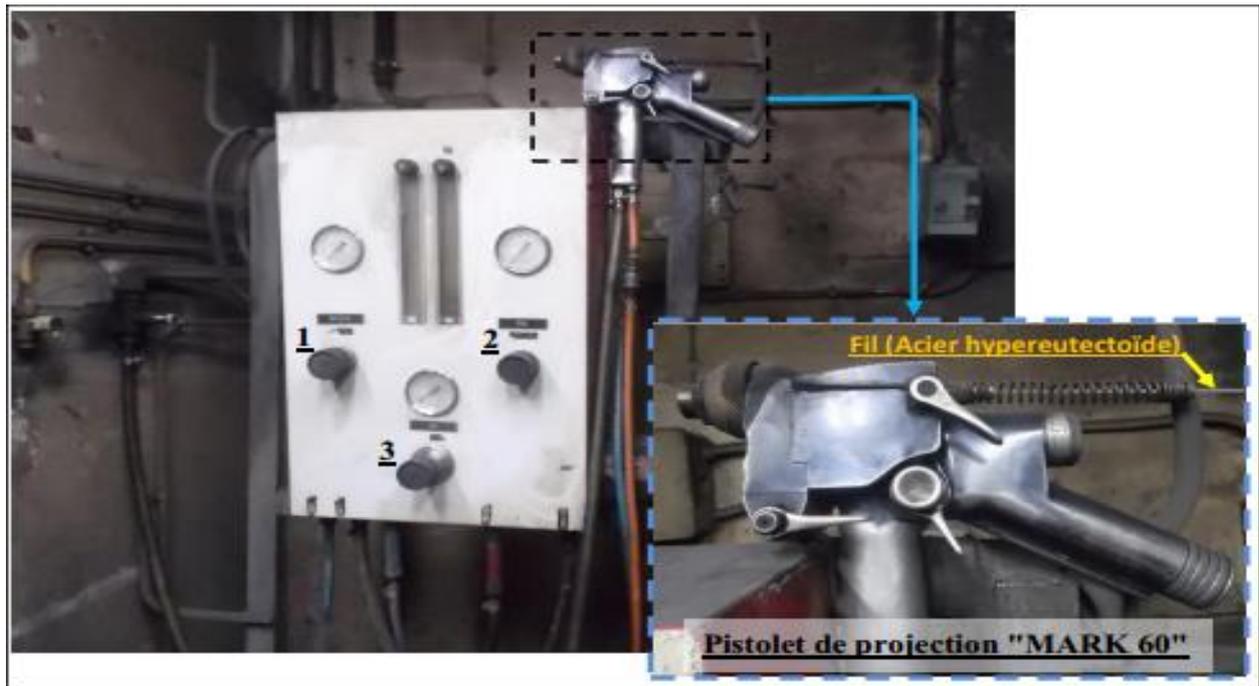


Figure II-3. Installation de projection thermique flamme-fil de l'entreprise ATRA de Bejaia. Pistolet de projection « MARK 60 » est relié à un tableau de commande qui permet de réguler la pression de l'oxygène (1), la pression de gaz propane (2) et la pression d'air (3).

Tableau II-3 : paramètres de projection utilisée par l'entreprise SNC ATRA.

Paramètre	Valeur
Pression de l'oxygène	4 bars
Pression de propane	3 bars
pression d'air de pulvérisation	4.5 bars
Distance de projection	140 mm
Angle de projection	90°
Vitesse d'avance de fil	1.5mm/s

II-6 Les post-traitements de recuit

Les post-traitements de recuit du revêtement brut de projection thermique sont réalisés à l'air au moyen d'un four à moufle. Les températures choisies sont 600°C et 800°C en vue de comparer les résultats des recuits réalisés par Belamri aux températures de 200, 300 et 450°C. La durée de ces recuits est de 90 minutes.

II-7 Techniques d'analyse et caractérisation des dépôts

II-7-1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Afin de caractériser les phases présentes, une analyse par diffraction des rayons X est effectuée. La diffraction des rayons X permet d'identifier les phases présentes dans l'échantillon, la nature des oxydes créés après projection et à différentes températures.

Pour notre travail, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) des revêtements est obtenue au moyen d'un diffractomètre Panalytical X'Pert Pro MPD équipé d'une anticathode de cuivre ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) sur une plage angulaire choisie de 30 à 120° avec un pas de $0,03^\circ$ et un temps de pose de 1 seconde. Les spectres sont analysés par le logiciel EVA couplé à la base de données des fichiers JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

II-7-2 Observation métallographique

II-7-2-1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique

L'observation métallographique nécessite une surface très brillante similaire à un miroir. Le polissage mécanique est réalisé à l'aide d'une polisseuse et des papiers abrasifs en carbure de silicium de différentes granulométries (du plus gros jusqu'au plus fin : P180 à P4000).

II-7-2-2 Microscope optique (MO)

Les examens métallographiques permettent une première approche pour une Compréhension des différentes microstructures des matériaux cristallins. Le microscope utilisé dans cette étude est celui du Département de Métallurgie de l'USTHB. C'est un microscope de type OPTIKA équipé d'une caméra, il permet l'observation des échantillons avec un grossissement qui varie de 50 à 1000. L'avantage de la microscopie optique c'est qu'elle nous permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais vu son faible résolution, il n'est possible de l'utiliser pour une observation fine des objets rugueux ou de petites tailles.

La figure II-4 montre le microscope optique, utilisé pour l'observation de nos échantillons.



Figure II-4. Microscope optique OPTIKA, équipé d'une caméra CCD.

II-8 Tenue à l'usure

II-8-1 Description de dispositif

Les essais d'usure sont effectués dans une configuration type pion stationnaire-disque rotatif comme le représente la figure ci-dessous.

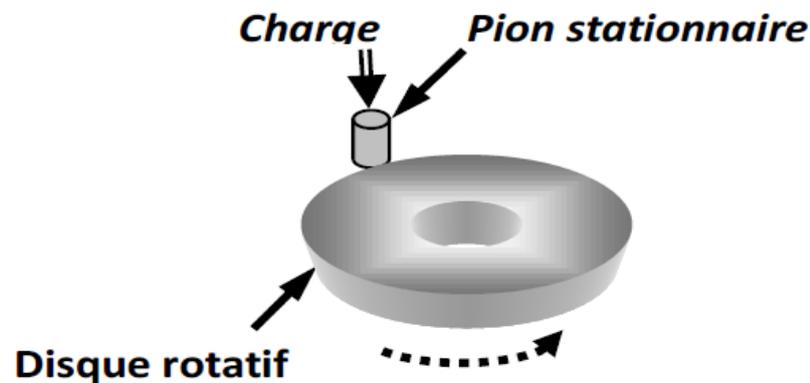


Figure II-5. Configuration pion sur disque permettant le teste d'usure en contact surfacique.

Le dispositif utilisé est celui conçu par Dr Abdelatif Belamri dans le cadre de sa thèse de doctorat. Son schéma de principe est présenté dans la figure ci-dessous.

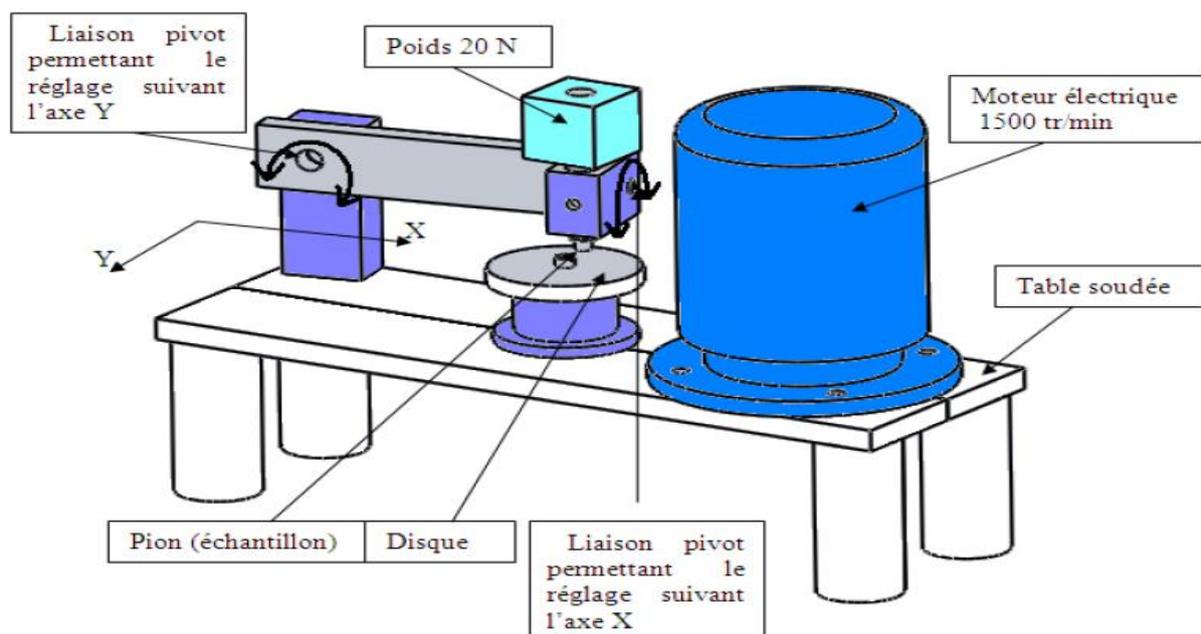


Figure II-6. Schéma du dispositif d'essais d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif [14].

En réglant le mécanisme au niveau des liaisons pivots suivant X et suivant Y nous pouvons assurer un contacte plan sur plan de la surface d'échantillon et celle du disque tournant entraîné par un moteur. Ce moteur électrique tournant à 1500 tr/min nous donne une rotation

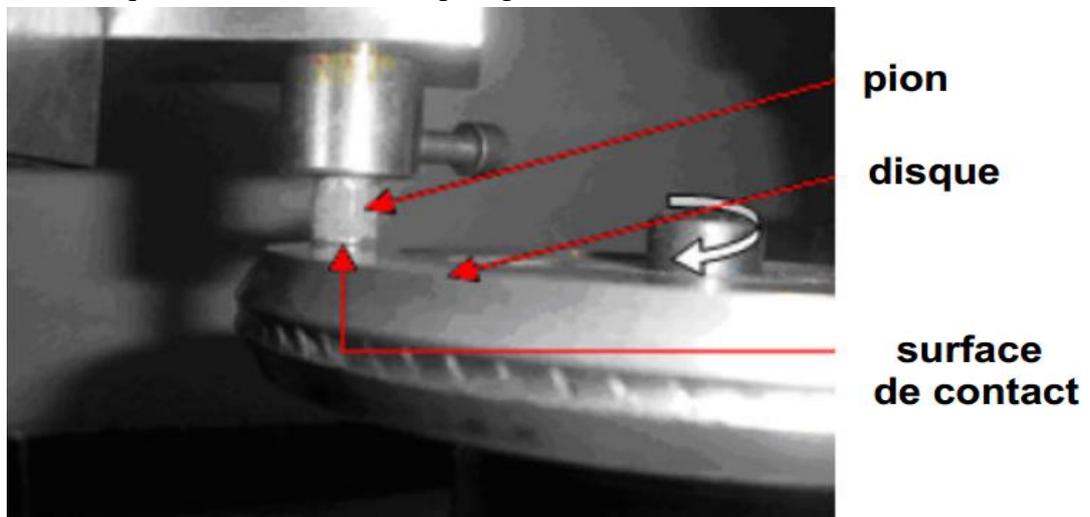
du disque de 360 tr/min. avec un diamètre du disque de 98 mm, nous obtenons une vitesse de glissement de 110 m/min, ce qui fait que pour une distance de glissement de 5 Km le temps d'essai sera de 45 minutes.

La figure II-7 illustre le dispositif du test d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif.



Figure II-7. Dispositif d'essai d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif.

La figure ci-dessous met en évidence la position de la surface du pion sur la surface du disque rotatif. Le disque rotatif est en acier rapide présentant une dureté Rockwell de 70 HRC.



FigureII-8. Détail sur la position du pion par rapport à la surface du disque rotatif mettant en évidence un bon contact surfacique du revêtement avec la surface du pion.

Les revêtements ont été déposés sur la surface de la tête de pion. Le disque rotatif utilisé est élaboré d'un matériau fritté Co-WC extra dure ayant une dureté de 70HRC. Les essais d'usure ont été réalisés à sec avec une charge 20 N et avec une vitesse de glissement de 110m/min (1.8 m/s) pendant 45 min. La perte de masse pour chaque essai est mesurée à l'aide d'une balance analytique de précision 0.1 mg.

II-8-2 Principe du test d'usure

Le but de la réalisation des dépôts est l'augmentation de la durée de vie technique des pièces mécaniques, et cela en suivant le comportement à l'usure du revêtement en évaluant sa perte de masse relative en fonction du temps. C'est une méthode d'analyse qui consiste à faire fonctionner un mécanisme, pendant un temps connu puis extraire la pièce à étudier et le peser afin de déterminer sa perte de masse. La précision de la mesure effectuée est de l'ordre du 0.1mg.

II-8-3 Procédures des essais

La procédure des tests est comme suit : avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs et doit être bien polie puisque les échantillons traités à 600° et 800°C lors de refroidissement à l'air il subit une décarburation donc il y aura des couches de calamine qui se détachent, si elles ne sont pas bien nettoyées, elles vont se détachées lors de l'essai à cause des vibrations, ce qui va influencer sur les résultats.

1. Peser l'échantillon et prendre la masse initiale M_0 à l'aide d'une balance analytique de précision de 0.1mg.
2. Nettoyer le disque rotatif.
3. Introduire l'échantillon dans le dispositif, et s'assurer de bon contact entre le pion et le disque, et l'actionner.
4. Mesurer la température chaque 5 minute.
5. Lorsque le temps d'essai est écoulé, on nettoie l'échantillon puis on prend la nouvelle valeur de sa masse (M_f).

Paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure :

La charge : la charge que j'ai appliquée à mes échantillons 20 newtons.

La vitesse : la vitesse avec laquelle j'ai travaillé est 110 m/min.

La durée : la durée que j'ai appliquée à mes échantillons est de 45 min.

Le nettoyage des pions avant et après l'essai.

II-9 Mesure de micro-duretés des dépôts

Les essais ont été réalisés au micro-duromètre SHIMADZU type HMV-2 du département de Métallurgie de l'USTHB (Alger). Ce dispositif permet de réaliser des mesures de la profondeur de pénétration jusqu'à 2 mm avec une précision de 0.02 μ m, la figure II-9 illustre le micro-duromètre, est composé de : platine X – Y (110x110 mm), diamant pyramidal Vickers, oculaire de mesure 10x réglable avec un capteur rotatif électronique.

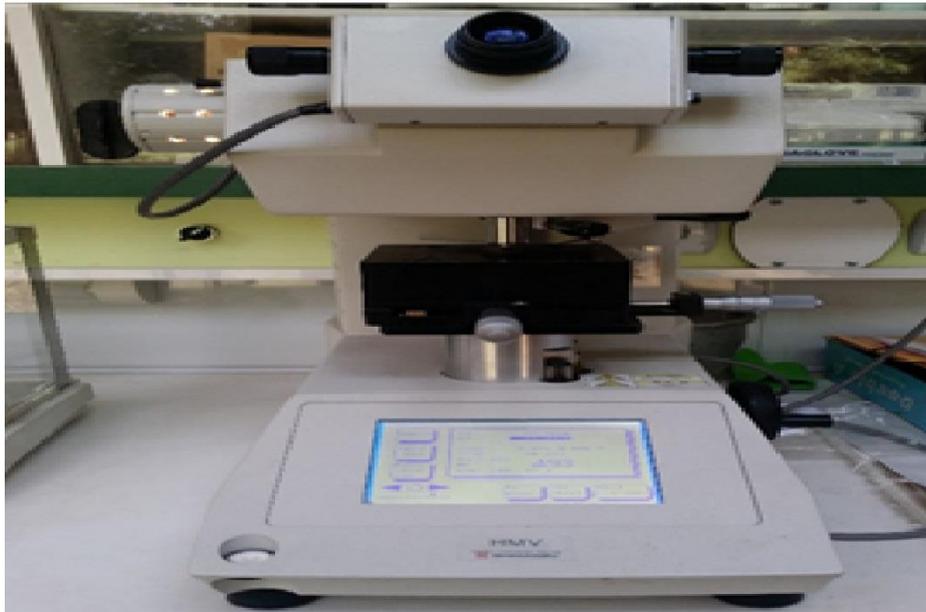


Figure II-9. Micro-duromètre SHIMADZU type HMV-2, utilisé pour nos essais.

II-10 Détermination du coefficient de frottement

La détermination du coefficient de frottement est faite en utilisant le tribomètre CSM du Laboratoire Science et Génie des Matériaux (USTHB, Alger). Le pion est une bille en 100Cr6 de dureté 63 HRC et d'un diamètre 6 mm, Les essais sont réalisés sur une distance de glissement de 28.34 m avec une vitesse de glissement 1.57 cm/s et sous une charge de 5 N, les conditions de l'environnement de l'essai est de 20°C et 40 % d'humidité. La figure II-10 illustre le dispositif de mesure de coefficient de frottement.



Figure II-10. Illustration du dispositif disque rotatif pion stationnaire type CSM.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III-1 Caractérisation microstructurale

La figure III-1 met en évidence l'aspect de la microstructure du revêtement brut projection thermique en acier hypereutectoïde ASM12. Elle met en évidence la présence de petites porosités notées par la lettre (B). L'origine de ces porosités est due soit à de microcavités résultat d'un empilage imparfait des gouttelettes, soit à des gaz enfermés pendant la solidification. On constate aussi des particules plus ou moins sphériques notées par la lettre (A), dénommées particules non fondues. Leurs présences sont dues au fait qu'elles soient initialement à l'état semi fondu (pâteux) à la sortie de la buse de la torche et continuent leur refroidissement en cours de leur envol avant leur impact avec la surface du substrat. Comme nous pouvons constater que ses revêtements sont composés de deux phases caractérisées par leurs différences de contraste (blanc et gris). En accord avec l'identification réalisé par Belamri [14] au microscope électronique à balayage équipé d'un micro analyseur, la phase en blanc notée par D représente la phase métallique et la phase en gris est identifié comme oxyde notée par C.

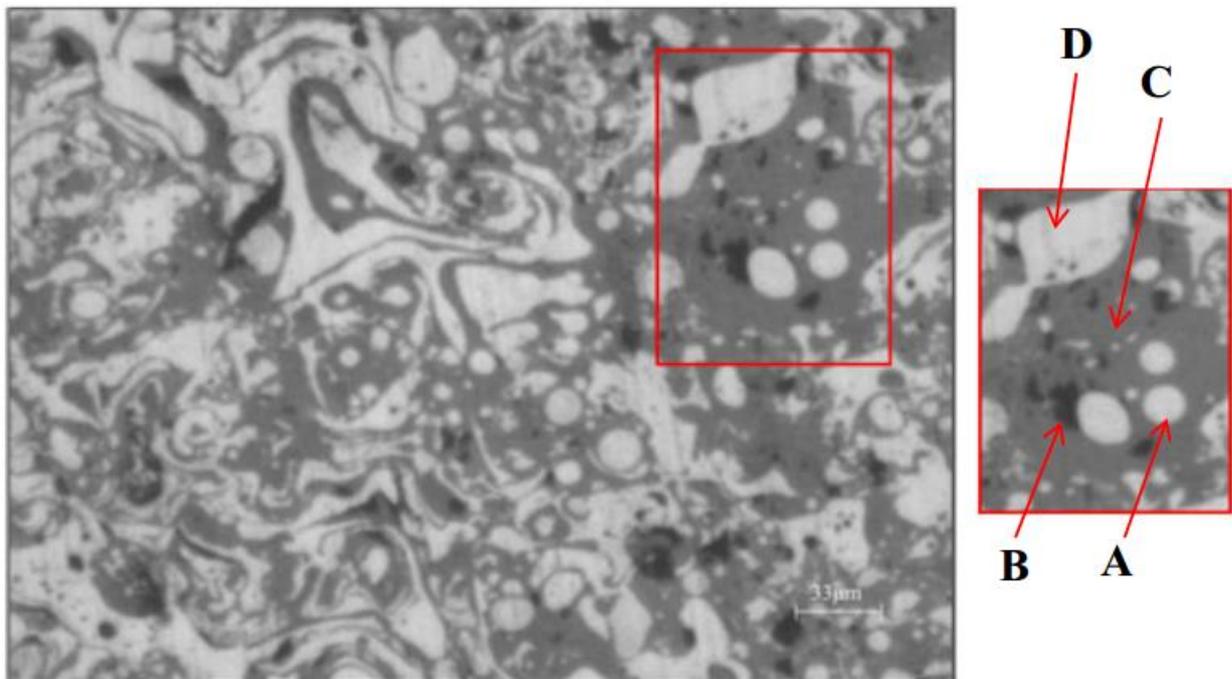


Figure III-1. Microstructures du dépôt en acier ASM12 brut projection réalisé par le procédé flamme fil. La phase de contraste gris constitue la phase oxyde et celle en blanc représente la phase métallique. La phase de contraste gris, notée C, constitue la phase oxyde et celle en blanc, notée D, représente la phase métallique. Les petites zones en noire, notée B, sont des porosités. Ces particules métalliques sphériques (A) constituent des particules non fondues.

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par un empilement successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est de type lamellaire (stratifiée), les particules s'écrasent sur les lamelles déjà solidifiées. Cette morphologie lamellaire est bien mise en évidence dans la figure III-2 (a et b) de la coupe longitudinale d'un échantillon Substrat-revêtement. La manière dont les premières gouttelettes s'étalent en épousant le contour

rugueux de la surface du substrat vont générer par la suite au fur et à mesure de la projection du métal fondu la morphologie ondulée de la microstructure du revêtement.

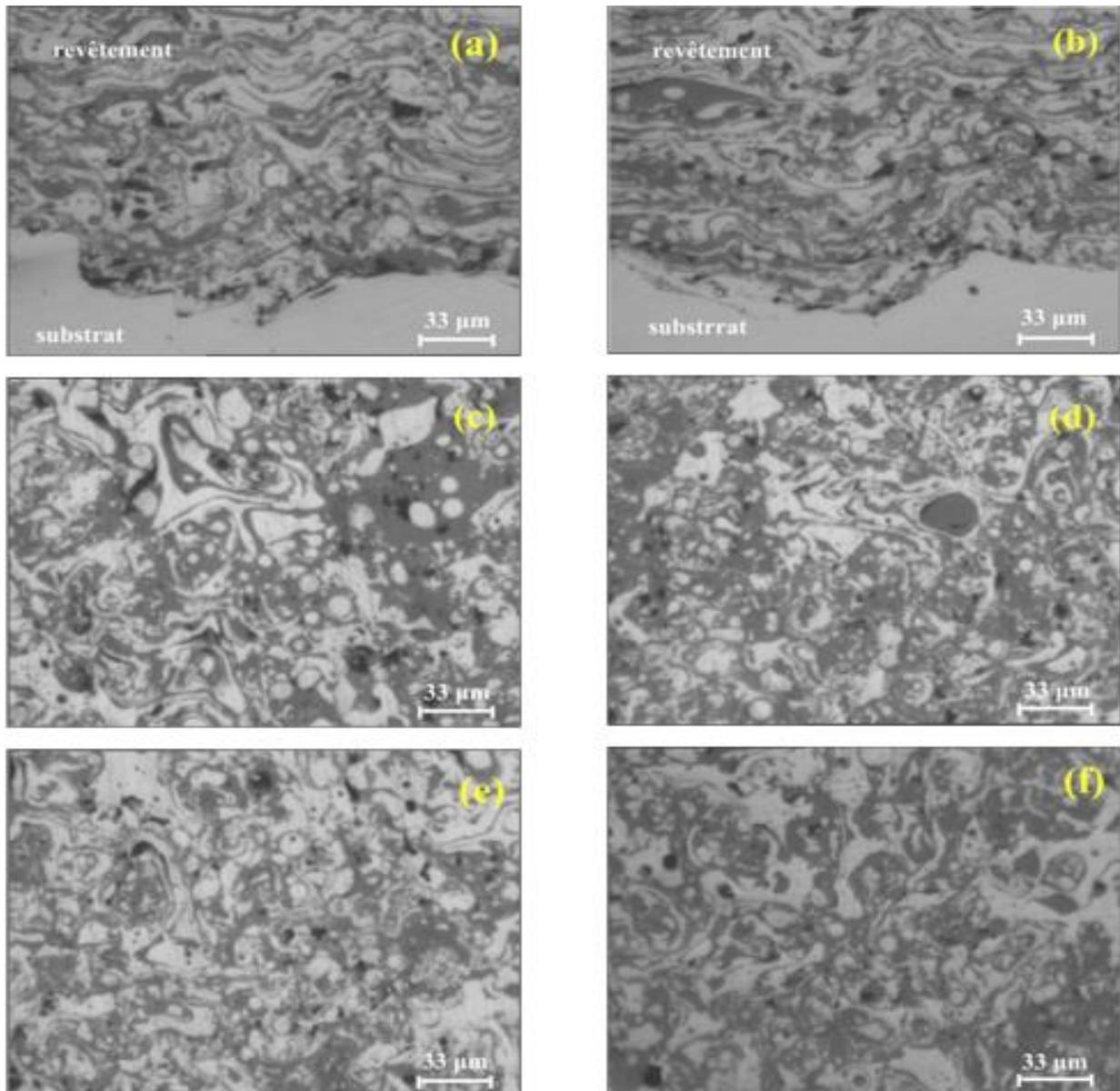


Figure III-2. Microstructure du dépôt en acier ASM12 réalisé par le procédé flamme fil, la phase en blanc est identifiée comme la phase métallique et la phase grise concerne les oxydes.

En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact de l'air, leur structure métallurgique est de type trempée. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt. La présence des oxydes s'explique par le fait que le bout du fil en acier ASM12 qui arrive au niveau de la buse du pistolet est fondu par la chaleur produite par la combustion du mélange oxygène/acétylène puis atomisé par une pression d'air pour former de fines gouttelettes projetées très rapidement sur la surface de substrat. La formation des oxydes est inévitable, elle commence au début donc lors du survol de la distance buse du pistolet/substrat et lors de refroidissements après leurs étalements sur le substrat.

Comme nous pouvons le remarquer sur les micrographies III-2 (c, d, e et f), le taux de la quantité de la phase métallique en blanc et celui de la phase oxyde en gris varient d'une zone à une autre. Par exemple sur la micrographie III-2 (d), la phase oxyde est plus importante contrairement à la micrographie III-2 (e) où c'est la phase métallique qui est majoritaire. Cet état de fait explique pourquoi les résultats de micro dureté des revêtements présentent une dispersion notable.

III-2 Identification des phases présentes par DRX

III-2-1 Revêtement brut de projection thermique

Le spectre de diffraction présenté dans la figure III-3 confirme les résultats des travaux de Belamri [13,14] : le revêtement est composé de la phase ferrite Fe- α cubique centrée, de la phase austénite Fe- γ cubique à faces centrées et des oxydes de fer FeO et Fe₃O₄. Un acier étant constitué, à l'état d'équilibre et à la température ambiante, de la phase ferrite Fe- α et de la cémentite Fe₃C, la présence inattendue de la phase Fe- γ est liée à la particularité de la technique de projection thermique que l'on peut assimiler à une brève pression suivie d'une trempe pour chaque particule du matériau projeté vers le substrat. La présence simultanée de ces deux phases ferrite Fe- α et austénite Fe- γ n'est pas propre qu'à un revêtement en acier hypereutectoïde puisque ceci est également mis en évidence dans un revêtement élaboré avec un acier eutectoïde (0,8%C) : Chen et al. [12]. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après son dépôt par projection thermique. À titre d'exemple, on peut citer le cas de l'alumine, projetée sous forme alpha (α -Al₂O₃) et qui se retrouve sous forme gamma dans le dépôt (γ -Al₂O₃) : Uma Devi [15], Sabiruddin et al. [16]. Cette dernière phase est métastable. Sa formation a été expliquée par une basse énergie de nucléation à partir du liquide : Mc Pherson [17]. La présence, par contre, des oxydes dans le revêtement est tout à fait attendue du fait que d'une part la projection du métal fondu se fait sous pression d'air et d'autre part chaque particule liquide de l'acier enveloppée d'une pellicule d'air tout le long de son envol va continuer son oxydation avec le piégeage de l'oxygène après son écrasement sur la cible.

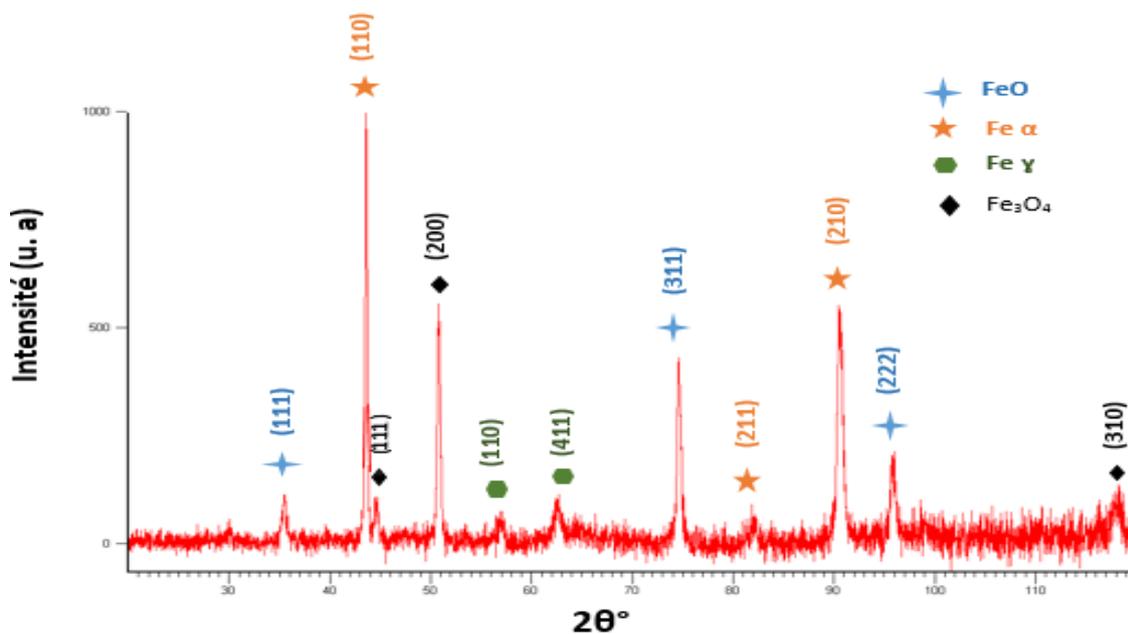


Figure III-3. Spectre DRX de revêtement brut de projection thermique mettant en évidence la présence de deux phases métallique (ferrite Fe- α et austénite Fe- γ) et deux oxydes FeO et Fe₃O₄.

Les phases métallique (ferrite Fe- α et austénite Fe- γ) et les deux oxydes présentent des contrastes tout à fait différents comme l'indiquent les résultats obtenus par Belamri en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB) couplé à un analyseur EDX (Figure III-4)

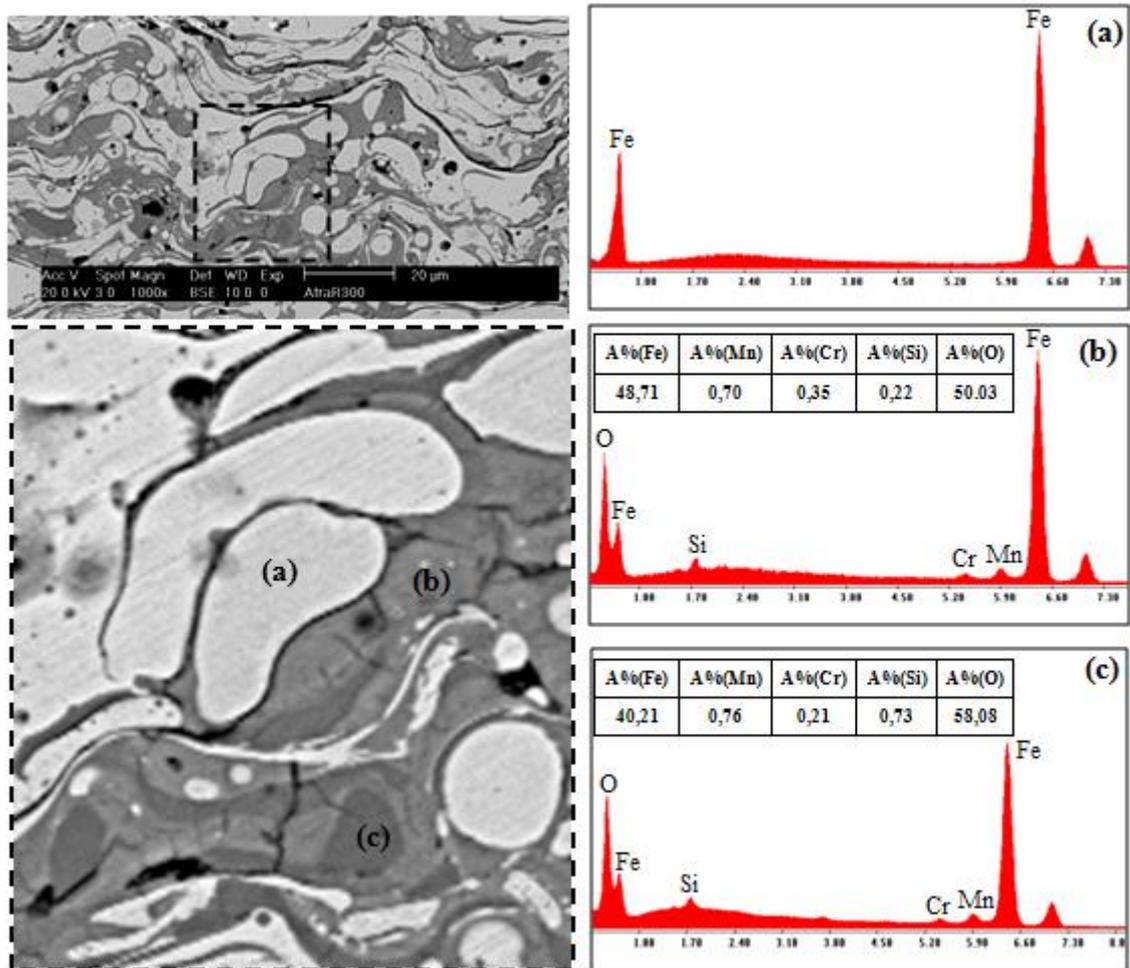


Figure III-4. Morphologie lamellaire typique du revêtement en acier hypereutectoïde élaboré par projection thermique flamme-fil. Observation au MEB en électrons rétrodiffusés. Les phases notées (a), (b), (c) représentent respectivement la phase métallique base Fe, oxyde FeO et oxyde Fe₃O₄ [14].

III-2-2 Revêtement après post traitement de recuit

Une première analyse de spectre de diffraction de la figure III-6 révèle la transformation complète de la phase austénitique Fe- γ en phase ferrite Fe- α , après les deux recuits à 600 et 800°C. Ceci confirme comme pour le cas des recuits aux températures 200, 300 et 450°C réalisés par Belamri [13,14], l'état métastable (hors équilibre) de cette phase. En effet, les pics de diffraction de la phase austénite γ -Fe présents dans le spectre de diffraction de la figure III-3 ne sont plus détectés dans les deux spectres de diffraction de la figure III-5 après les recuits à 600 et 800°C.

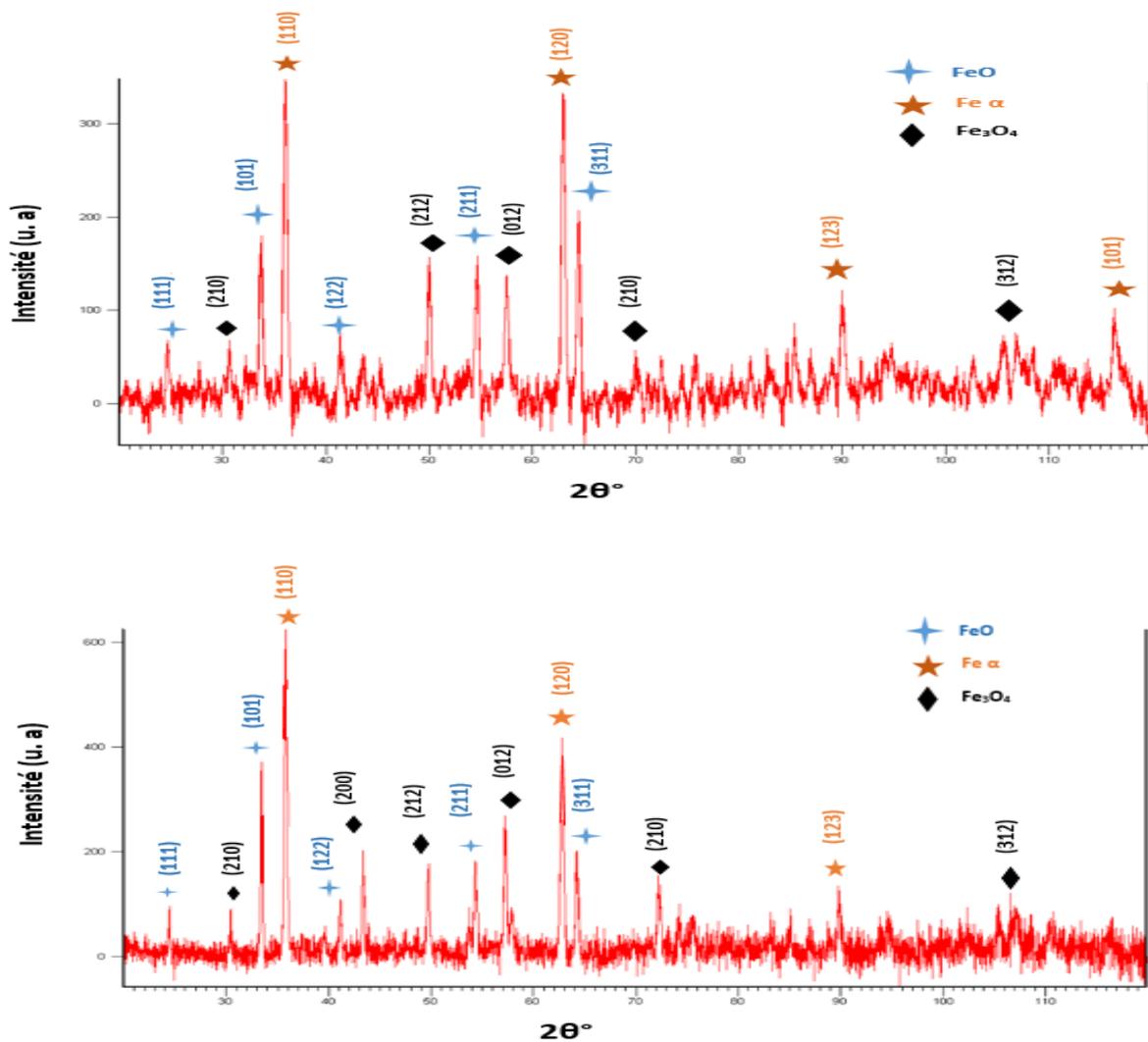


Figure III-5. Spectres DRX du revêtement en acier hypereutectoïde, après post traitements de recuit aux températures 600 et 800°C.

A partir d'un traitement des différents spectres de diffraction (Brut de projection thermique et après recuit aux températures de 200,300 et 450°C) par le logiciel Diffract-EVA, Belamri a mis en évidence que la fraction de la phase ferrite (Fe- α) augmente en fonction d'évolution de la température des recuits et la quantité d'oxyde fer type Fe_3O_4 augmente au détriment de FeO.

Autrement dit FeO s'oxyde davantage en fonction de la température pour se transformer en oxyde stable Fe₃O₄.

III-3 La micro-dureté

La figure III-6 rassemble les résultats de la micro dureté Vickers pour les différents types de revêtements, brut de projection et dépôts recuits aux températures de 600 et 800°C. Les résultats sont une moyenne de 12 mesures de micro-dureté, sous une charge 500g et un temps de maintien de 10s réalisées sur chaque type de revêtement. Les résultats concernant le revêtement brut de projection thermique sont ceux obtenus par Belamri [14].

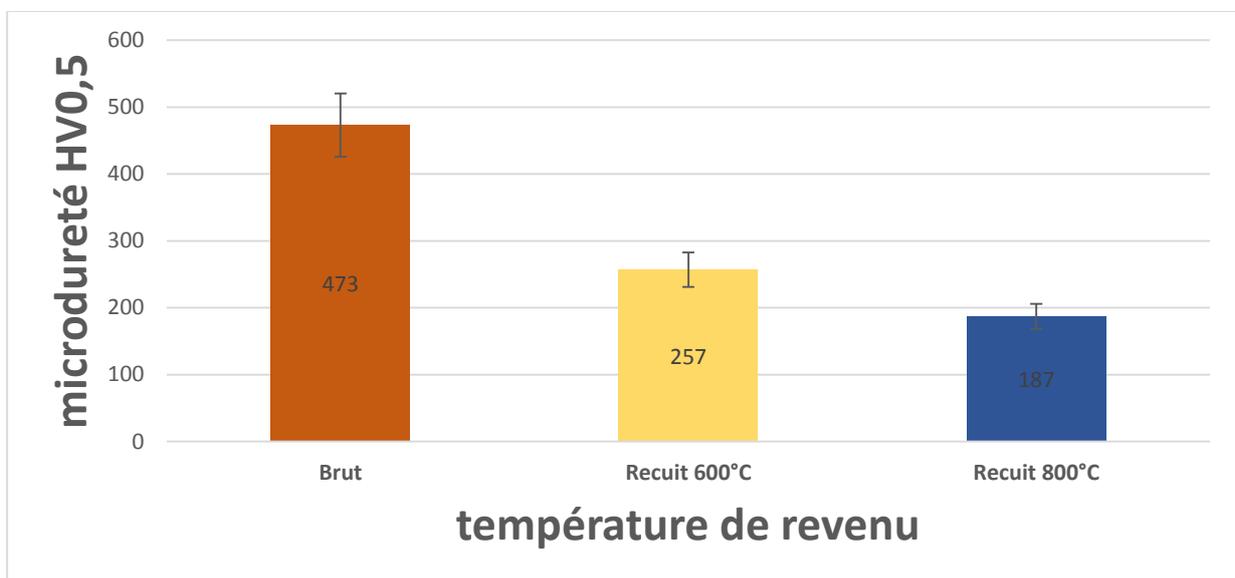


Figure III-6. Micro dureté Vickers sous une charge 500g des dépôts, brut et autres après les différents post traitement. Les barrettes de chaque histogramme indiquent la valeur maximale et la valeur minimale après 12 mesures réalisées sur chaque revêtement. Les résultats du brut de projection thermique sont ceux obtenus par Belamri [13].

Dès la première observation sur cette figure on remarque que le recuit procure au revêtement un adoucissement notable à travers une chute de la micro-dureté: elle chute de 84% pour le revêtement traité à 600°C par rapport au brut de projection. Le recuit à 800°C fait baisser la micro dureté d'environ 37% par rapport à celui traité à 600°C. Cet adoucissement pourrait s'expliquer par une nette tendance à la recristallisation en fonction de la température du recuit des différentes phases présentes dans le revêtement conjointement à la disparition de la phase austénite Fe- γ plus compacte et plus dense que la phase ferrite Fe- α .

III-4 Tenue à l'usure

La figure III-7 présente sous forme d'histogrammes, rassemble les résultats du comportement à l'usure de la surface du revêtement (configuration pion revêtu contre la surface d'un matériau

fritté (Co-WC extra dur)). La charge utilisée est de 20N avec une vitesse de glissement 110 m/min. Les résultats sont exprimés en pourcentage de perte de masse du revêtement brut de projection thermique et revêtements après les post traitements de recuit aux températures 600 et 800°C. Les barrettes sur chaque histogramme indiquent la valeur maximale et la valeur minimale obtenue après 5 essais réalisés pour chaque condition.

La perte de masse relative en pourcentage est calculée comme suit :

$$Mr = \frac{M_0 - M_i}{M_0} * 100$$

Avec : M_r : masse initiale relative en %, M_0 : masse initiale, M_i : masse instantanée.

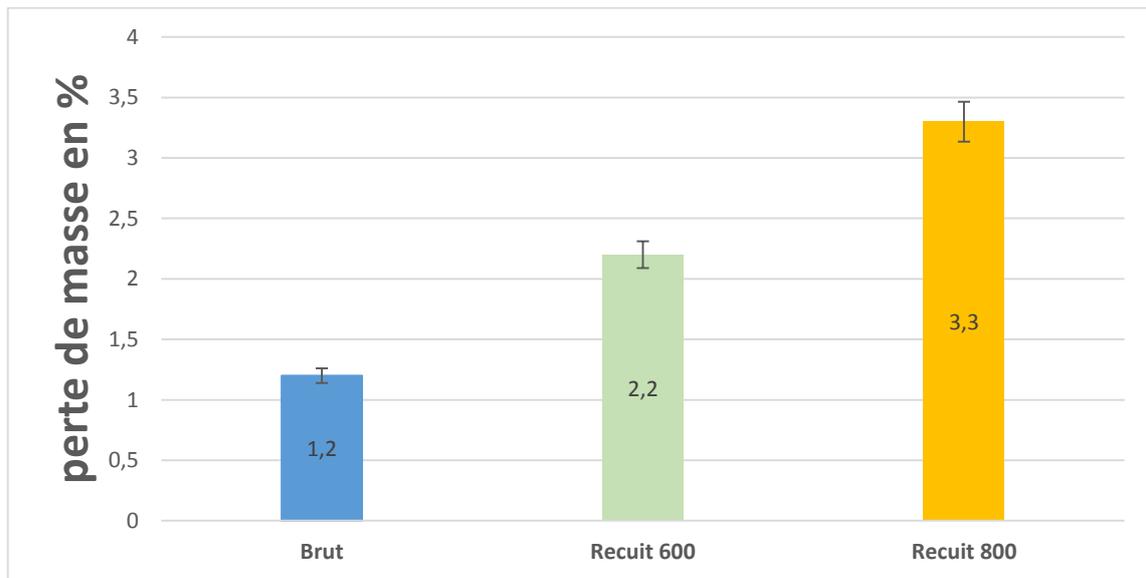


Figure III-7. Perte de masse du revêtement en acier hypereutectoïde ASM12, brut projection thermique et après des recuits à 600 et 800°C. Les essais sont réalisés sous une charge de 20N sur une distance de glissement de 5 Km. Les barrettes sur chaque histogramme indiquent la valeur maximale et la valeur minimale obtenues sur six essais.

Ces résultats de la figure III-7 mettent en évidence ce qui suit :

- le revêtement brut de projection thermique est plus résistant à l'usure que les deux autres revêtements ayant subi le post traitement de recuit,
- par rapport au revêtement brut de projection thermique, la perte de masse augmente de 83 % lorsque le revêtement est recuit à 600°C.
- cette détérioration de la résistance à l'usure est encore accentuée lorsque la température de recuit passe à 800°C : on enregistre une augmentation de 50% de la perte de masse par rapport au revêtement recuit à 600°C.

Il semblerait donc que la présence de la phase austénite (Fe- γ) plus compacte et plus dense que la phase ferrite (Fe- α) à côté d'une faible quantité d'oxyde par rapport au revêtement recuit confère une meilleure résistance à l'usure du revêtement brut de projection thermique.

III-5-1 Evolution de la température en fonction du temps

L'utilisation d'un thermomètre infrarouge nous a permis de déterminer l'évolution de la température d'échauffement du revêtement en cours d'usure au contact du matériau antagoniste en matériau fritté Co-W de dureté 70HRC. Les températures sont relevées chaque 5 mn. Ceci a donné lieu aux courbes présentées dans la figure III-08.

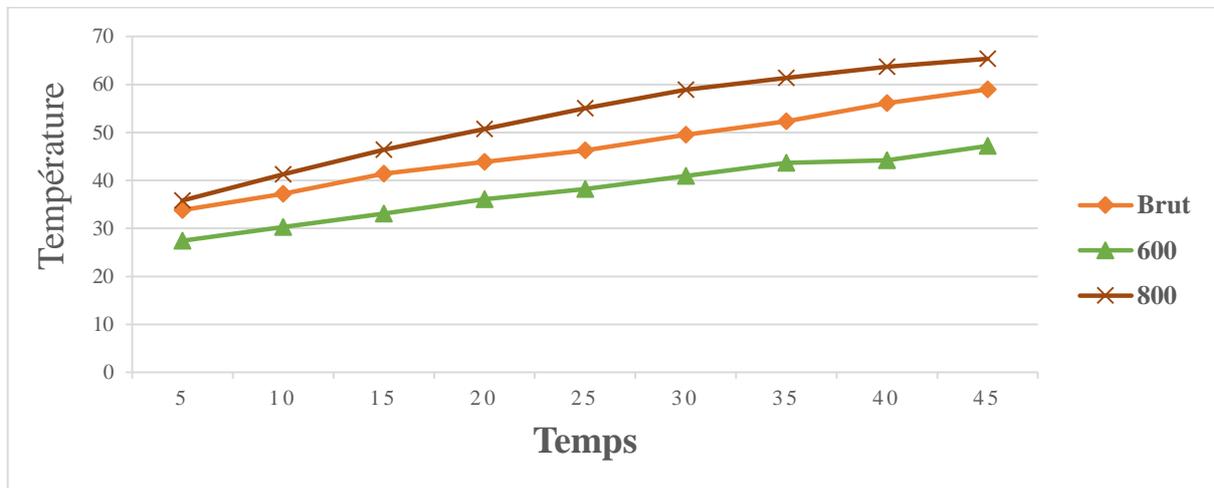


Figure III-8. Variation de la température en fonction du temps

La variation de la température en fonction du temps est presque linéaire, nous pouvons constater que le revêtement traité à 800°C présente une température de contact supérieure à celles des autres revêtements (brut de projection thermique et recuit à 600°C). On enregistre une tendance à une stabilisation vers la fin de l'essai. Cette température de stabilisation est de l'ordre de 65, 58 et 47°C pour respectivement le revêtement recuit à 800°C, le revêtement brut de projection thermique et celui recuit à 600°C.

III-5 Coefficient de frottement

L'évolution de coefficient de frottement en fonction du temps et la distance de glissement pour les deux revêtements traités respectivement à 600 et 800°C, sont présentés dans les figures III-9 et III-10. La charge utilisée est de 5 N sur une distance de glissement de 28.3 m avec une vitesse de glissement de 1.57 cm/s (ce qui donne une durée d'essai de 30 mn).

Il est remarquable de constater que les deux recuits confèrent au revêtement un palier unique de stabilisation du coefficient de frottement avec des valeurs moyenne de l'ordre de 0,52 et 0,60 pour respectivement les recuits à 600 et 800°C. Avec un recuit de 300°C du même revêtement, Belamri obtient une stabilisation du coefficient de frottement autour de la valeur 0,35 [13]. Ces trois résultats mettent clairement en évidence que l'augmentation de la température de recuit fait augmenter le coefficient de frottement. Par ailleurs, au regard des valeurs obtenues sur le taux d'usure ($0,66 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ pour 600°C et $1,06 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ pour 800°C), Il est remarquable de constater que l'augmentation du coefficient de frottement entraîne un important taux d'usure

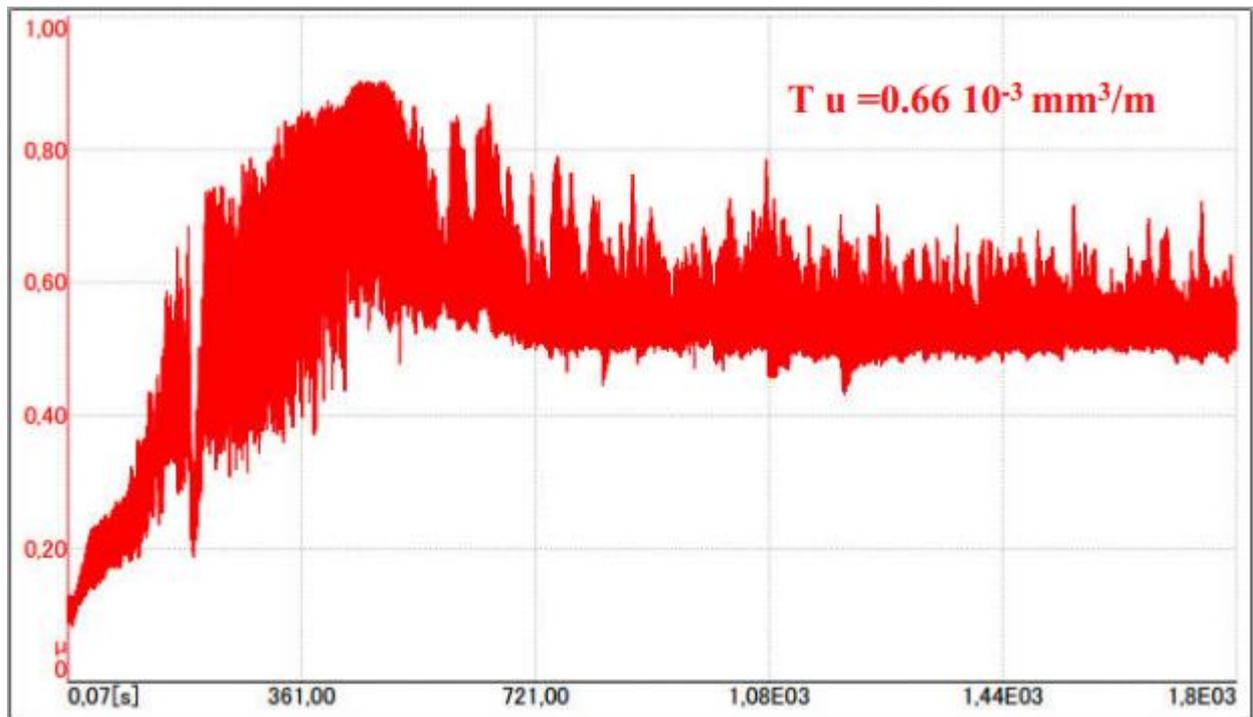


Figure III-9 : Evolution du coefficient de frottement du revêtement traité à 600°C. Charge 5N, distance de glissement 28.3 sous une vitesse de glissement de 1.57 cm/s. Tu indique le taux d'usure en mm^3/m

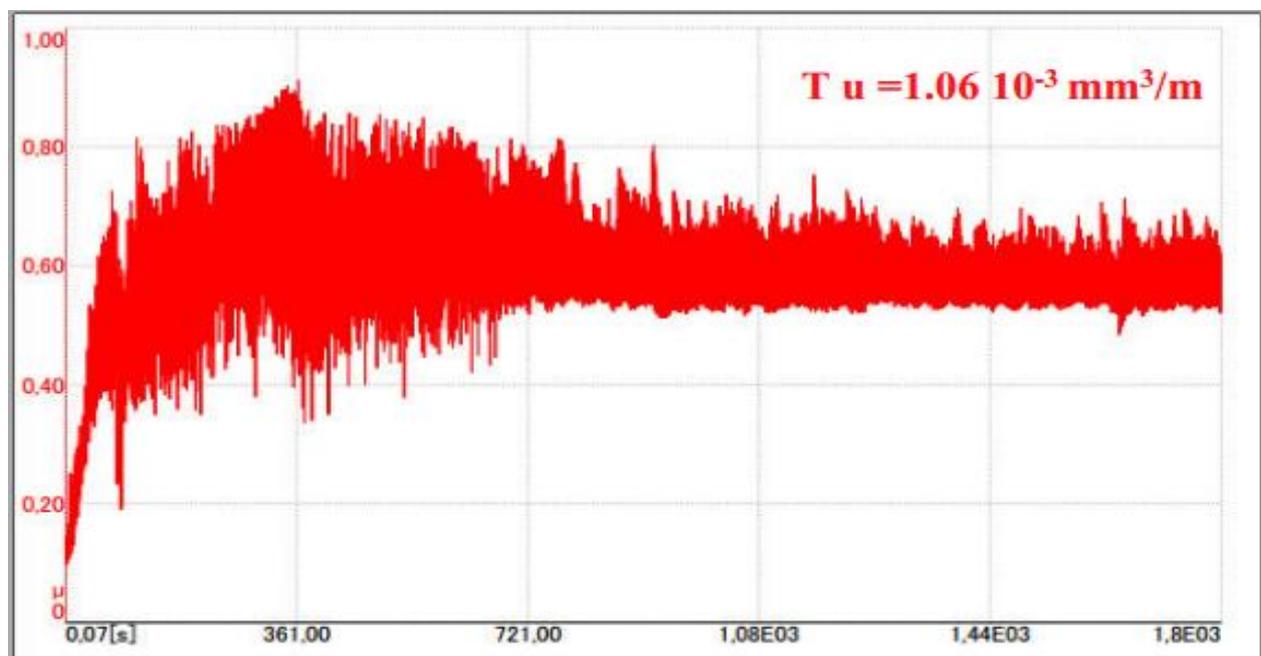


Figure III-10. Evolution du coefficient de frottement du revêtement traité à 800°C. Charge 5N, distance de glissement 28.3 sous une vitesse de glissement de 1.57 cm/s. Tu indique le taux d'usure en mm^3/m

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les principaux résultats obtenus dans ce travail se résument comme suit :

- l'acier hypereutectoïde utilisé comme revêtement élaboré par projection thermique développe après projection thermique une nouvelle phase Fe- γ cfc très dure en présence de la phase ferrite habituelle ;
- le revêtement est composé également de deux oxydes : FeO et Fe₃O₄ ;
- De ce fait, le revêtement brut de projection thermique avec sa microstructure quadriphasée ne peut être considéré comme un acier ;
- Les recuits aux températures de 600 et 800°C durant 90 min permettent à la phase austénite Fe- γ cubique à faces centrées de se transformer en phase Fe- α cubique centrée ;
- Ces deux recuits procurent un adoucissement du revêtement. La micro dureté baisse de moitié pour le revêtement traité à 800°C et d'environ 40% pour celui traité à 600°C ;
- le comportement à l'usure selon la configuration pion stationnaire sur disque rotatif confère au revêtement brut projection une meilleure tenue à l'usure en termes de perte de masse. Cependant des post traitement sont inappropriées au vu du grand écart entre cette perte de masse et celle obtenue sur le revêtement traités. Un recuit de 600°C fait augmenter la perte de masse de plus de 40%. Pour le recuit à 800°C, on enregistre une augmentation de la perte de masse de l'ordre de 60% ;
- les deux recuits confèrent au revêtement un palier unique de stabilisation du coefficient de frottement avec des valeurs moyenne de l'ordre de 0,52 et 0,60 pour respectivement les recuits à 600 et 800°C ;
- Avec un recuit de 300°C du même revêtement, Belamri obtient une stabilisation du coefficient de frottement autour de la valeur 0,35;
- Ces trois résultats mettent clairement en évidence que l'augmentation de la température de recuit fait augmenter le coefficient de frottement ;
- Par ailleurs, au regard des valeurs obtenues sur le taux d'usure ($0,66 \cdot 10^{-3}$ mm³/m pour 600°C et $1,06 \cdot 10^{-3}$ mm³/m pour 800°C), il est remarquable de constater que l'augmentation du coefficient de frottement entraîne un important taux d'usure.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Cartier, usure des contacts mécaniques, techniques de l'ingénieur, BM5065 à BM5061, 2001.
- [2] M, Khelil, Thèse doctorat. Tenue à l'usure d'un acier ordinaire à dépôt d'alumine par plasma, université de Setif, 2012
- [3] A. Prôner, revêtement par projection thermique. Paris: technique de l'ingénieure, 1999.
- [4] K. Fataoui et al, « modèle d'étalement d'une goutte en projection plasma : application au revêtement de matériaux thermiquement dégradables », université de Limoges, 2015
- [5] I.R. KRIBA, Thèse doctorat, « étude numérique de l'écrasement de particules fondues sur des substrats métalliques application au procédé de projection thermique », université de Batna, 2010
- [6] E .SOKOLOV, Thèse doctorat « contribution au développement de la projection thermique à très faible pression », Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009
- [7] M.A. Baradai, thèse doctorat « rénovation de pièces mécanique usées par la technique de projection thermique. Caractérisation structurale et mécanique de types de revêtements métallique » université de bejaia, 2007.
- [8] S. Nourouzi, Thèse doctorat, « contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive», université de Limoges, 2014
- [9] S. Barbara, panorama de la projection thermique en France, Institut National de la Recherche et de Sécurité, 2014
- [10] Edrisky et al. Wear of thermal spray deposited low carbon steel coatings on aluminum alloys. Wear, 2001 a. 251(1-12): p1023-1033
- [11] Edrisky et Alpas, microstructures and sliding wear resistances of 0.2% carbon steel deposited by HVOF and PTWA thermal spray processes. Thin Solid Films, 2002. 240-421: p.338-344.
- [12] Chen et al, Heat treatment induced intermetallic phase transition of arc-sprayed coating prepared by the wires combination of aluminium-cathode and steel-anode. Applied Surface Science, 2009. 255 : p. 8299-8304.

- [13] A. Belamri et col., Hypereutectoid steel coatings obtained by thermal flame spraying Effect of annealing on microstructure, tribological properties and adhesion energy. *Surface & Coatings Technology*, 2015.
- [14] A. Belamri. Caractérisation microstructurale et mécanique de deux revêtements en alliages durs élaborés par projection thermique. Application aux moteurs thermiques. Université de Bejaia. 2016.
- [15] M. Uma Devi, New phase formation in Al₂O₃-based thermal spray coatings. *Ceramics International*, 2004. 30(4): p. 555-565.
- [16] K. Sabiruddin et al, Analysis of phase transformation in plasma sprayed alumina coatings using rietveld refinement. *Surface and Coatings Technology*, 2010. 204(20) p. 3248-3253.
- [17] R. Mc Pherson, transient temperatures produced by abrasion of aragonite. *Wear*, 1973. 23(1): p.83-86.

Annexe

Calcul de taux d'usure

Variable	Notation
Charge (N)	(A)
Distance (m)	(B)
Rayon de la piste d'usure (mm)	(C)
D : largeur de sillon (mm)	(D)

	Formule de calcul
V perdu selon CSM catalog (mm ³)	$V_p = (2 * 3,14 * C) * ((9 * \text{ASIN}(D/6)) - ((D/4) * ((36 - (D * D))^{0,5})))$
Taux d'usure selon CSM (mm ³ /Nm)	$T = V_p / (A * B)$
Taux d'usure mm ³ /m	$T_u = T * A$

Évolution de la température du revêtement en cours d'usure en contact surfacique

Variation de la température de brut projection

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Echa 1	34	38.5	42.4	44	48	51.6	53	56.1	49.4
Echa 2	33.4	36.2	40.1	43.4	45	48.3	50	53	55
Echa 3	33.4	35	40	43	45.1	48	53	58.4	61
Echa 4	34.4	38	41.5	43.8	45	48.3	50	55.1	58
Echa 5	33.8	38.2	43.2	45.1	48.2	51.4	55.6	58	61.4

Variation de la température de revêtement traité à 600°C

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Echa 1	28	30.5	33	34	36	40.3	44.33	37.5	41.2
Echa 2	28	36.6	31.6	36.6	46	48.7	52	55.4	58
Echa 3	28	30.2	32.2	34	36	39	41	42.5	44.8
Echa 4	25	28	30.5	32.8	34	36.1	38	40.2	43.5
Echa 5	28.3	31.2	33.1	36.4	38.9	40.5	43	45.5	48.6

Variation de la température de revêtement traité à 800°C

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Echa 1	36.6	39.4	44.4	49	54.3	60	64.2	66.3	67.4
Echa 2	37	43.2	47.5	51.3	57.2	60.3	61.4	63.4	67.2
Echa 3	32	39.4	44.3	49.6	53.4	57.3	59.4	61.8	62.9
Echa 4	36.6	39.4	44.4	49	54.3	60	64.2	66.3	67.4
Echa 5	37.6	43.2	49.3	53	55.4	58.1	60.4	63.2	64.1

Teste d'usure

Résultats obtenus

Charge = 20 N, distance de glissement 5 Km

M_0 = masse initiale, M_f = masse finale

Résultats obtenus pour le brute projection

	M_0			M_f		
Echantillon1	9,5753	9,576	9,5758	9,48	9,483	9,483
Echantillon2	10,122	10,1233	10,1234	9,9805	9,9903	9,9905
Echantillon3	8,9851	8,9856	8,9855	8,8975	8,8973	8,8959
Echantillon4	9,028	9,0282	9,0287	8,918	8,9177	8,9177
Echantillon5	8,4936	8,4935	8,4931	8,37	8,369	8,3686

Résultats obtenus pour le revêtement traité à 600°C

	M_0			M_f		
Echantillon1	10,3825	10,3823	10,3815	10,276	10,2767	10,2768
Echantillon2	10,422	10,4216	10,4236	10,251	10,2518	10,252
Echantillon3	10,225	10,2259	10,2253	9,8969	9,896	9,8957
Echantillon4	9,4164	9,4163	9,4171	9,1995	9,199	9,1988
Echantillon5	10,461	10,4615	10,4611	10,159	10,16	10,1604

Résultats obtenus pour le revêtement traité à 800°C

	M_0			M_f		
Echantillon1	9,352	9,353	9,3534	9,05	9,0516	9,0517
Echantillon2	9,704	9,7045	9,7047	9,328	9,3275	9,3289
Echantillon3	9,94	9,9405	9,9404	9,614	9,6145	9,6147
Echantillon4	9,534	9,5348	9,5347	9,327	9,3274	9,3275
Echantillon5	9,243	9,2435	9,2434	8,85	8,8507	8,8505

Mesure de micro-dureté HV 0.5 pour le revêtement traité à 600°C

301	242
289	230
307	253
224	250
236	217
307	236

Mesure de micro-dureté HV 0.5 pour le revêtement traité à 800°C

122	111
299	259
114	244
244	114
114	250
114	264