



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

**Projet de Fin D'études  
Pour l'obtention de diplôme de  
Master en Génie Mécanique et Matériaux**

Thème :

**Influence des passes sur les propriétés mécaniques  
de rechargement dur**

Proposé et encadré par :

Mr .Nacer bacha

Etudié par :

- TOUAIBIA Mohamed
- CHAMMA Abdenour

## RESUME

Dans le cadre de cette étude, nous avons projeté des dépôts de deux poudres à base de Nickel ( 8435PE ) et (Eutalloy 10009) séparément sur l'acier ordinaire par projection thermique à flamme-poudre ,d'un autre part on a fait des dépôt de différents formes avec le procédés MIG avec un file fourrée à base de Fer :( TeroMatec® 4327 ) sur le même types d'acier dans le but d'augmenter la résistance à la corrosion et à l'usure.des pièces utilisée dans les deux procédés.

L'objectif principal de ce travail est de voir l'impacte du changement des paramètres du rechargement dur tel que le nombres de couches de projection thermique et la forme de soudage par MIG sur les propriétés mécaniques.

L'objectif principal de ce travail est de voir l'impacte du changement des paramètres du rechargement dur tel que le nombres de couches de projection thermique et la forme de soudage par MIG sur les propriétés mécaniques.

Des essais de dureté, de microdureté et des essais d'érosion ont été réalisés pour mesurer les propriétés mécaniques durs. Le microscope optique a été utilisé pour observer les microstructures des dépôts obtenus

Les résultats ont montré que:

1. En général, les poudres commerciales avec une forte proportion en éléments carburigènes auront de meilleures dureté si elles sont déposées en plusieurs couches. A l'inverse, celles dont la composition est appauvrie en éléments carburigènes, une seule couche est recommandée.

- 2.En ce qui concerne le rechargement par le procédé Teromatec, la dureté augmente avec le nombre de passes en faisant atténuer l'effet de dilution.

3. Nous remarquons que le rechargement avec passe exécutée de façon rectiligne a un meilleur comportement en usure que celle exécutée en zigzag.

- 4.L'opération de déposition de manière automatique assure une meilleure reproductibilité des résultats.

# Sommaires

CHAPITRE 1.....	1
LES RECHARGEMENTS DUR.....	1
1.1.Définition des rechargements durs : .....	1
1.2.Termes relatifs au rechargement dur .....	1
a ) Reconstitution .....	2
b ) Couche tampon / Sous-couche .....	2
1.3.Le rechargement dur par fusion.....	2
1.3.1.Les avantages du rechargement .....	3
1.3.2.Les procédés de soudage par fusion dédiés au rechargement dur .....	4
1.4.Taux de dilution .....	5
1.5.Motifs des cordons:.....	6
Passes juxtaposées avec recouvrement continu .....	7
Passes déposées à intervalles réguliers:.....	7
Passes en quadrillage:.....	8
Points de soudage :.....	8
1.6.Fissures de retrait.....	8
1.7.Température de préchauffage:.....	9
1.8.Choix du consommable de rechargement dur :.....	11
La désignation normalisée suivant EN 14700 :.....	11
1.9.Classification en familles de produits :.....	11
1.10.La projection thermique :.....	11
Projection flamme avec refusion :.....	12
Projection à l'arc électrique :.....	12
Projection au plasma atmosphérique (APS) :.....	12
1.11. l'usure :.....	13
Définition :.....	13

CHAPTIRE 2.....	14
USURE DES MATERIAUX.....	14
2.1. Les différents types d'usure.....	14
2.1.1. Abrasion faible ou modérée / faible impact :.....	14
2.1.2. Abrasion forte / sous-pression.....	15
2.1.3. Abrasion sévère / fort impact :.....	15
2.1.4. Adhésion / friction :.....	16
2.1.5. Érosion.....	16
2.1.6. Cavitation :.....	17
2.1.7. Fatigue thermique :.....	17
2.1.8. Fatigue de contact / fretting :.....	18
2.1.9. Corrosion :.....	18
2.1.10. Usure combinée :.....	19
3.chapitre 3.....	19
3.1 Introduction.....	19
3.2) Choix des matériaux.....	19
3.2.1 Alliages de rechargement.....	19
a)Poudre.....	19
b) Fils.....	20
3.3 Préparation des échantillons.....	21
a) Découpage des échantillons :.....	21
b) Préparation des surfaces:.....	21
1) Meulage :.....	21
2) Grenailage .....	21
c) Revêtements .....	22
<input type="checkbox"/> procédés de projection thermique à flamme.....	22
<input type="checkbox"/> Rechargement par soudure.....	23

d) Préparation métallographique :.....	24
Tronçonnage :.....	24
Enrobage :.....	25
Polissage :.....	25
Attaque chimique :.....	26
3) Moyens de caractérisations.....	26
a) Microscope optique .....	26
b) Techniques de caractérisation mécaniques.....	27
Essais de dureté/micro-dureté Vickers .....	27
Erosion :.....	27
Chapitre 4 :.....	29
Résultat et discussion.....	29
4.1.Introduction :.....	29
4.2. Projection a flamme-poudre :.....	29
4.2.1.aspect de surfaces des différentes poudres réalisées .....	29
4.2.2.microstructure et épaisseur des dépôts.....	30
4.2.3.Résultat de la microdureté .....	32
4.2.4.Résultat de test d'érosion.....	34
4.3.Rechargement par MIG :.....	35
4.4.essai d'érosion.....	37
CONCLUSION GENERALE.....	40

## Liste des figures :

Figure 1 : rechargement dur.....	1
Figure 2 : Taux de dilution .....	5
Figure 3 : Pourcentage de dilution.....	5
Figure 4 : Presse à rouleau avec chevron pour broyage.....	6
Figure 5 : Passes juxtaposées avec recouvrement continu.....	7
Figure 6 : Passes déposées à intervalles réguliers.....	8
Figure 7 : Passes en quadrillage.....	8
Figure 8 : Fissures de retrait.....	9
Figure 9 : Abrasion modérée.....	14
Figure 10 : Tôles de transport.....	15
Figure 91: Broyeur à charbon.....	15
Figure 12 : Marteau de broyeur.....	16
Figure13 : adhésion/friction.....	16
Figure 14 : Erosion d'un équipement de dragage.....	17
Figure15 : étapes de la création de cavitation.....	17
Figure 16 : Fatigue thermique.....	18
Figure 17 : création des fissures lors d'une fatigue de contact.....	18
Figure 18 : Vis sans fin corrodée.....	19
Figure 19 : Forme des tôles utilisées.....	19
Figure 20 : La guillotine.....	21
Figure 21 : Aspect des tôles après sablage.....	22
Figure 22 : Grenailleuse.....	22
Figure 23 : Pistolet a flamme-poudre " kit Eutalloy ".....	23
Figure 24 : Appareil du soudage TEROMATEC.....	24
Figure 25 : micro tronçonneuse.....	25
Figure26: Enrobeuse.....	25
Figure 27 : Microscope optique.....	26

Figure 28 : Microdurometre HMV-2 SHIMADZU.....	27
Figure29: Montage pour l'essai d'érosion.....	27
Figure 30 :Aspect surfacique des revetements par flamme-poudre.....	29
Figure 31 :(a) épaisseur du dépôt de poudre 1 (b) : Dépôt de la poudre 8435PE à bas de NiSiFeBCrC.....	30
Figure 32 : Dépôt de la poudre 10009 à base NiCrBSiFeC.....	31
Figure 33: Micro-dureté du revêtement 8435PE à base de NiSiFeBCrC.....	33
Figure 34: Micro-dureté du revêtement 10009 à base NiCrBSiFeC.....	33
Figure 35 : Essai d'érosion de la poudre 8435PE à base de NiSiFeBCrC.....	34
Figure 36 : Essai d'érosion de la poudre.....	35
Figure 37: Dureté et microdureté des échantillons rechargés par Teromatec.....	36
Figure 38: Rechargement droit et en zigzag avec le Teromatec.....	37
Figure 39: Essais d'érosion (CN: passe droite, CZ: couche zigzag).....	38

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différents procédés de rechargement dur. ....	4
Tableau 2 : Température de préchauffage en fonction du métal de base:.....	10
Tableau 3 : Les caractéristiques des poudres utilisées :.....	20
Tableau 4 : Composition chimique (% massique) de la poudre " 8435PE " :.....	20
Tableau 5 : composition chimique (%massique) de la poudre " Eutalloy 10009 ".....	20
Tableau 6 : Les composant du file utilisé.....	21
Tableau 7 : Paramètres de projection thermique de l'Eutalloy :.....	23
Tableau 8 : Réactifs d'attaque :.....	26
Tableau 9 : Paramètres de l'essai d'érosion :.....	28
Tableau 10 : paramètres de soudage.....	36

# INTRODUCTION GENERALE

La plupart des entreprises industrielles veillent à ce que leur économie soit la meilleure possible et donc luttent contre toutes les raisons pouvant défavoriser cette dernière. Cependant, la dégradation superficielle des métaux et alliages tels que la fatigue, la corrosion, le frottement et l'usure, sont les phénomènes les plus inquiétants dans le domaine industriel qui peut engendrer de grandes pertes économiques en endommageant les pièces métalliques utilisées dans différentes industries. C'est pourquoi, il est nécessaire de lutter contre ces phénomènes afin de diminuer ces pertes.

A cet effet, les différentes technologies de dépôt et de traitements de surface sont incontournables car ils permettent de rénover et de protéger ces pièces mécaniques.

La projection thermique est un terme générique qui regroupe un ensemble de procédés utilisés pour déposer des matériaux métalliques et non métalliques sur une pièce à revêtir. Elle a pour objectif le rechargement des matériaux endommagés ou la mise des couches protectrices afin de satisfaire les exigences sévères.

Cette technique est couramment utilisée dans de nombreux secteurs industriels tels que la construction navale (pale d'hélice, les coques des navires usées,...), nucléaires, aéronautique (ailettes de turbines fixes, chambre de combustion, pièces d'usure et d'abrasion,...), automobiles (têtes de soupape, pales de turbocompresseur, pistons,...), industrie papetière, minière, chimique,... elle permet de modifier les propriétés de la pièce et de lui conférer des propriétés spécifiques en surface pour une bonne résistance à la corrosion et à l'usure ou des propriétés fonctionnelles (chimiques, électriques, magnétiques).

Le rechargement par soudage MIG et le deuxième procédés utilisée dans notre étude est aussi comme la projection thermique destiné à résister aux différents types d'usure.

en première partie ce projet propose de réaliser des revêtements durs des dépôts sur des substrats en acier ordinaire par projection thermique à flamme-poudre avec refusion au moyen d'un pistolet à gaz oxyacétylénique. Ces revêtement sont réalisés à partir d'une poudre « 8435PE » et une autre poudre « EUTALLOY 10009 », Ce sont deux poudre a base de nickel On a étudié l'influence de nombre de couches de revêtement sur la microstructure et les propriétés mécaniques sont à étudier.

a la deuxième partie de ce projet de réaliser deux forme de rechargement par soudure MIG avec un file fourrée a base de Fer :(C-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-Ti-Fe), La première consiste a faire un dépôt sous forme d'un cordon et l'autre sous forme d'un (ZIG-ZAG), Et de voir l'influence de la forme de du dépôt sur les propriétés mécaniques.

Cette étude a pour objectif :

- la réalisation de plusieurs revêtements durs sur des substrats en acier ordinaire à partir de deux poudres à base de (Ni) projeté séparément par projection thermique à flamme-poudre avec différent nombre de couches des dépôts sur des substrats en acier ordinaire.
- Caractérisation de la microstructure des différents revêtements : Microscope optique.
- Caractérisation mécanique : Dureté, micro-dureté et le test d'érosion.
- réalisation des dépôt par soudage MIG sur substrat en acier ordinaire avec deux différents forme de dépôt
- Caractérisation mécanique : Dureté, micro-dureté et le test d'érosion.

La réalisation du projet est faite en deux parties :

- La réalisation des revêtements et la préparation des échantillons sont faites au niveau de l'atelier du département mécanique de l'université de Saad Dahlab de Blida 1.
- La caractérisation des propriétés mécaniques et de la microstructure sont faites au département de mécanique de l'université Saad Dahlab de Blida 1

Pour cela, la présentation est scindée en quatre chapitres :

1. Une recherche bibliographique concernant les rechargements dur en général, la projection thermique et Les différents procédés de soudage par fusion en particulier.
2. Ce chapitre est consacré a comprendre le phénomène d'usure et ces différents types.
3. Une partie expérimentale dans laquelle on a exposé nos techniques expérimentales et les différents outils utilisés dans notre travail ainsi qu'une description des méthodes de caractérisation de nos revêtements.
4. Le dernier chapitre est réservé à la présentation et l'interprétation des résultats.

Ce travail sera bien sur clôturé par une conclusion générale.

## CHAPITRE 1

## LES RECHARGEMENTS DURS

**1.1. Définition des rechargements durs :**

Le “rechargement dur” n’apporte aucune amélioration des caractéristiques mécaniques de la pièce. Son utilité réside dans l’amélioration de la résistance à l’usure de surface.

Certains contrôles peuvent être utiles pour qualifier le mode opératoire de soudage.

Ils seront limités à : [1]

- Essais de dureté.
- Examens macrographiques et/ou micrographiques.
- Contrôle visuel.
- Ressuage (parfois spécifié, ex : rechargement STELLOY Cobalt)

La figure (1) montre les caractéristiques d'un rechargement dur.

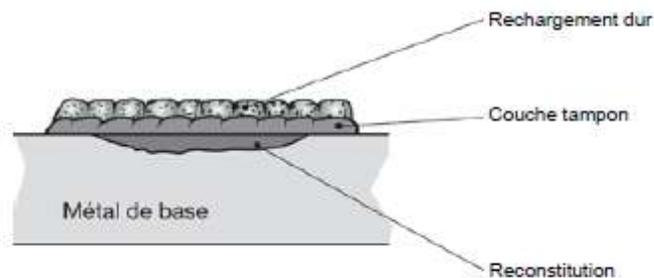


Figure 1 : rechargement dur [1]

Un rechargement dur sain est avant tout un dépôt travaillant en compression. Par nature, certains métaux d’apport de soudage imposent la réalisation d’un dépôt en une seule couche maximum. Cela est dû à leur grande sensibilité à la fissuration de contrainte (ex : dépôt avec formation de borures). Bien que l’application soit similaire, il est important de différencier le “rechargement dur préventif” du “rechargement dur curatif”.

En rechargement préventif on pourra définir librement le métal de base et ainsi se prémunir des inconvénients souvent rencontrés dans le cadre d’un “rechargement curatif”. Dans ce deuxième cas, on doit tenir compte des contraintes liées au type de métal de base (carbone équivalent élevé, préchauffage élevé nécessaire, etc. [1])

**1.2. Termes relatifs au rechargement dur :**

Le vocabulaire propre aux opérations de réparation et de rechargement en maintenance est très riche.

Ainsi, il est primordial de différencier les termes suivants : “reconstitution”, “couche tampon” et “rechargement dur”.

Chacun de ces termes décrit une application bien précise qui requiert des précautions de soudage particulières.

**a ) Reconstitution :**

La “reconstitution” est l’action de remettre à la cote initiale une pièce dont la géométrie aurait été modifiée par l’effet de l’usure. On utilisera dans ce cas prioritairement un métal d’apport homogène : analyse chimique et caractéristiques mécaniques identiques à celles du métal de base.

Dans certains cas, il est toutefois possible d’utiliser un alliage hétérogène, à condition que ses caractéristiques soient compatibles avec celles du substrat.

Les trois facteurs importants pour définir le métal d’apport de reconstitution approprié sont :

- Le risque de fissuration à froid : il faut définir la température de préchauffage ainsi que la température entre-passe.
- La température de service et donc, la dilatation différentielle entre métal d’apport et métal de base.
- La réalisation d’un rechargement après reconstitution et donc, la compatibilité entre les métaux d’apport utilisés. [2]

**b ) Couche tampon / Sous-couche :**

Aussi appelée “sous-couche” ou encore “transition métallurgique”, la “couche tampon” n’est pas toujours nécessaire.

Avant de réaliser cette couche intermédiaire, il est donc important de se poser plusieurs questions :

- Quelle est la nature du métal de base ?
- Comment respecter scrupuleusement le préchauffage préconisé par la nature du métal de base avant rechargement ?
- Le rechargement dur est-il métallurgiquement compatible avec le métal de base ?
- Pourquoi une couche tampon ou sous couche ?
- Assurer l’accrochage entre le métal de base et le rechargement dur.
- Éviter la propagation des fissures de retrait du rechargement vers le métal de base.

Le choix du métal d’apport est à réaliser avec grande précaution. En effet, une différence d’élasticité trop importante entre les matériaux ou un écart de dilatation à température excessif, risque de provoquer des niveaux de contraintes trop élevés en zone de liaison.

Dans ces conditions, il y a un risque de rupture prématuré de la réparation.[5]

**1.3.Le rechargement dur par fusion**

Il faut d’abord préciser le vocabulaire propre aux opérations de rechargement :

- Hardfacing / Surfacing : Rechargement dur.
- Cladding / Placage : Rechargement noble (type anti-corrosion).

### 1.3.1. Les avantages du rechargement :

C'est la solution idéale qui garantit un dépôt de qualité et une baisse des coûts de maintenance :

- Extension de la durée de vie de l'équipement.
- Fenêtre de maintenance plus courte et solution adaptable.
- Coût de réparation moins élevé.
- Large gamme de rechargement possible.
- Une solution sur mesure, automatisable. [3]

### 1.3.2. Les procédés de soudage par fusion dédiés au rechargement dur :

Les différents procédés de rechargement dur sont résumés au tableau 1.

#### ➤ Le procédé TIG :

Lors du procédé TIG, un arc électrique est produit entre une électrode réfractaire en tungstène et la pièce.

Le bain de soudage est protégé sous une atmosphère inerte (gaz de protection) afin d'éviter son oxydation.

#### Le procédé arc électrode enrobée :

L'électrode est composée d'une âme métallique et d'un enrobage. Grâce à un arc électrique, le bain de fusion est créé entre l'électrode et la pièce. Le laitier, produit par la fusion de l'enrobage, a une fonction de protection contre l'oxydation du métal fondu. Il peut contribuer à l'analyse chimique du dépôt.

#### ➤ L'électrode tubulaire :

L'électrode tubulaire est composée d'une paroi mince (type feuillard) remplie de poudres. Ce type d'électrode est uniquement utilisé pour les applications de rechargement dur. L'arc électrique s'établit de façon uniforme entre la paroi tubulaire et la pièce. On obtient ainsi une dilution plus faible et des dépôts plus larges qu'en électrode enrobée conventionnelle.

Grâce à un film protecteur, les électrodes tubulaires permettent un dépôt de haute qualité. En effet, ces dernières sont moins sensibles à la reprise d'humidité que les électrodes standards.

#### ➤ Le procédé semi-automatique sous protection gazeuse :

Le métal fondu est obtenu par un arc électrique créé entre un fil électrode (plein ou tubulaire fourré) et le métal de base. Les fils fourrés à laitier permettent :

- d'améliorer les caractéristiques de fusion,
- de protéger le métal fondu d'une oxydation excessive.

On parle souvent de MetallInertGas (MIG) et de Metal Active Gas (MAG), en fonction du gaz de protection utilisé.

Ce procédé est facilement automatisable.

➤ **Le procédé semi-automatique sans protection gazeuse :**

Procédé identique au MIG/MAG, il présente l’avantage d’être très facilement utilisable car il ne nécessite pas l’utilisation de gaz protecteur.

Il est principalement utilisé dans les cas suivants :

- Conditions de travail difficiles pour les autres procédés de soudage(soudage en extérieur, courant d’air, etc.).
- La réaction avec l’ambient n’est pas préjudiciable aux performances du dépôt.

Aussi appelé “Open arc”, ce procédé est particulièrement adapté pour les solutions de rechargement dur (excellentes caractéristiques de dureté, résistance à l’usure).

➤ **L’arc submergé :**

Le métal fondu est généré par un arc électrique entre un fil et la pièce, sous un “manteau” de flux solide (poudre). L’arc électrique n’est pas visible.

La configuration de ce procédé et l’utilisation du flux en poudre limitent son application aux positions de soudage à plat.

Le soudage à l’arc submergé est un procédé qui permet des taux de dépôt très élevés.[4]  
[6]

Tableau 1 : Différents procédés de rechargement dur.

Nom complet	Abréviation	Type	Précautions	Protection du bain	Dilution	Taux de Dépôt kg/h
Soudage sous gaz avec électrode de tungstène	TIGGTAW	Manuel / Automatique	Arc électrique	Gaz	5 - 15 %	0,5 - 1,5
Soudage à l’arc avec électrode enrobée	MMA SMAW	Manuel	Arc électrique Étuvage	Laitier	15 - 30 %	1,0 - 3,0
Soudage à l’arc avec électrode tubulaire	TE	Manuel	Arc électrique	-	8 - 30 %	2,0 - 4,0
Soudage à l’arc avec fil fourré sous protection gazeuse	MAG FCAW	Semi-automatique / Automatique	Arc électrique	Gaz	15 - 35 %	3,0 - 10,0
Soudage à l’arc avec fil fourré auto-protecteur (sans protection gazeuse)	FCAW	Semi-automatique / Automatique	Arc électrique	Avec ou sans laitier	15 - 35 %	3,0 - 12,0
Soudage à l’arc submergé	SAW	Automatique	Étuvage flux	Laitier	30 - 50 %	5,0 - 20,0

#### 1.4. Taux de dilution :

En rechargement, la maîtrise du taux de dilution est essentielle. Elle permet de garantir l'analyse chimique du dépôt, les duretés et la constance de qualité. La figure (2) montre schématiquement l'effet du taux de dilution sur le couple substrat/revêtement.

Lors de l'opération de soudage, il y a interaction du métal de base et du métal d'apport, tous deux en fusion. Le mélange qui est issu de ces deux éléments correspond au taux de dilution.

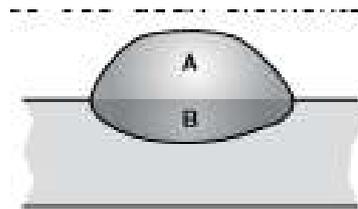


Figure 2 : Taux de dilution[6]

Calcul de temps de dilution :  $\% \text{ dilution} = \frac{B}{(A+B)} \times 100$

Lors des opérations de rechargement, nous rechercherons toujours à limiter la dilution. Ceci afin d'optimiser les caractéristiques du dépôt, tout en prenant garde d'éviter un phénomène de collage. La figure (3) montre l'effet de dilution sur le substrat.

Comment maîtriser la dilution ?

- Choix du procédé et des paramètres de soudage utilisés : Suivant l'apport de chaleur induit par chaque procédé, la dilution sera plus ou moins prononcée.
- Séquence de soudage : Un recouvrement entre-passes suffisant, d'environ 50 %, permettra de mieux contrôler sa dilution. Un rechargement multi passes permettra une dilution plus faible que le rechargement mono passe.[7]

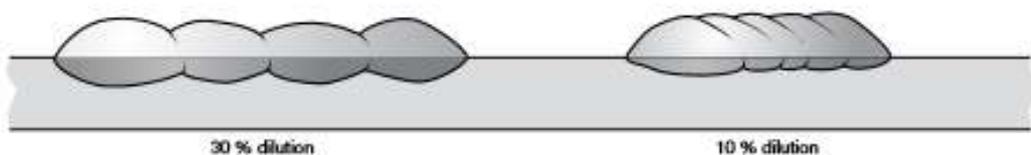


Figure 3 : Pourcentage de dilution [7]

- Choix de la polarité : DC+ ; DC- ; AC Les changements de type de polarité peuvent influencer le taux de dilution.
- Technique de soudage L'apport de chaleur est directement lié à la technique de soudage : cordons tirés ou balayés.
- Position de soudage : Position corniche (PC) à privilégier si possible pour réduire la dilution par rapport au soudage à plat (PA).

Pour les applications de rechargement dur, plusieurs facteurs ont une influence dans le choix du procédé de soudage :

- Productivité et taux de dépôt.
- Épaisseur de rechargement.
- Milieu de travail : en atelier ou à l'extérieur.
- Possibilité d'automatisation.
- Répétitivité du travail. | Qualité d'accrochage.

Ce dernier point, "la qualité d'accrochage", est directement lié à la pénétration du cordon dans le substrat. En cas de sollicitation à l'impact/au choc, un rechargement ayant une force d'accrochage élevée aura une bien meilleure tenue dans le temps. En cas de dilution élevée avec le substrat, impliquant une baisse de propriété mécanique (notamment les duretés), il est nécessaire de trouver le bon compromis entre analyse chimique requise et force d'accrochage.[8]

### 1.5.Motifs des cordons:

Dans certains cas, la réalisation de cordons géométriques donne une excellente résistance à l'usure. La figure (4) montre un exemple d'un dépôt de rechargement dur sur une presse à rouleau.

Plus économique, ce type de dépôt répond à l'usure par abrasion faible ou modérée sous faible impact.

Pour ces applications, le type de géométrie à réaliser dépend directement de la dimension et de la texture de l'abrasif

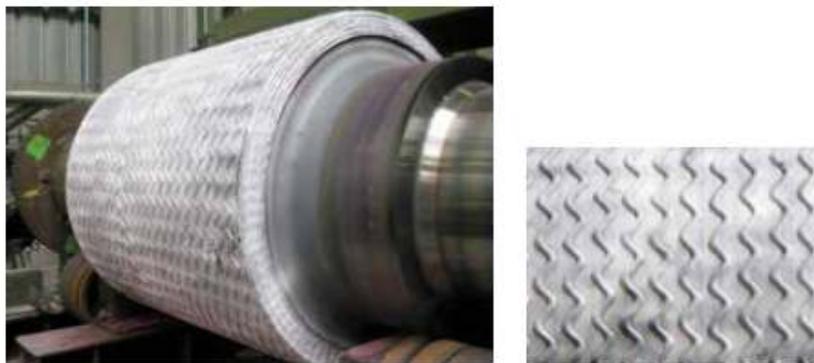


Figure 4 : Presse à rouleau avec chevron pour broyage.[10]

Le principe de ces rechargements consiste à limiter le déplacement relatif du matériau abrasif sur les pièces et de créer, éventuellement, une barrière contre l'usure, en emprisonnant de la matière dans les sous-reliefs (colmatage par effet "caisse à pierre").[10]

Différents types de motifs existent :

- Des passes juxtaposées avec recouvrement continu.
- Des passes déposées à intervalle régulier.

- Des passes en croisillons / quadrillage.
- Des points de soudage.

➤ **Passes juxtaposées avec recouvrement continu :**

En cas d'abrasion forte et sévère, le rechargement dur sera continu sur l'ensemble de la surface concernée. De cette manière, il n'y aura aucun contact entre l'élément extérieur et le métal de base (substrat). Les cordons seront alors juxtaposés avec un recouvrement entre-passes de 50 % afin de garantir les caractéristiques optimales du rechargement (en limitant la dilution). Dans la majorité des cas, les cordons de soudure sont orientés dans le même sens que le flux et limitent ainsi les zones pouvant créer des "buttées".

La figure (5) montre un schéma du recouvrement continu.[9]

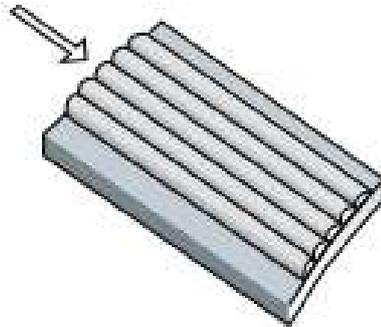


Figure 5 : Passes juxtaposées avec recouvrement continu

**Passes déposées à intervalles réguliers:**

En cas d'abrasion faible ou modérée (sans impact), il est possible de limiter le rechargement à plusieurs passes disposées à une distance régulière (voir figure 6). L'espacement entre cordons est un facteur primordial dépendant directement de la taille de l'abrasif. En cas d'abrasion importante, il faut réduire l'espace entre les cordons. Sens des cordons par rapport au flux de fonctionnement :

- Abrasifs de taille importante : les cordons sont déposés parallèlement à leur écoulement.
- Abrasifs et particules fines (sable ou terre) : les cordons de soudure sont orientés perpendiculairement au flux avec un dépôt sans fissure. L'espacement entre cordons dépendra de la texture de l'abrasif : sec ou humide.

Dans un environnement humide, un agglomérat de particules se forme et se loge plus facilement entre les cordons. La distance entre cordons pourra alors être légèrement augmentée. Néanmoins, afin de garantir une bonne protection, il est recommandé de limiter cette distance .[9] [11]

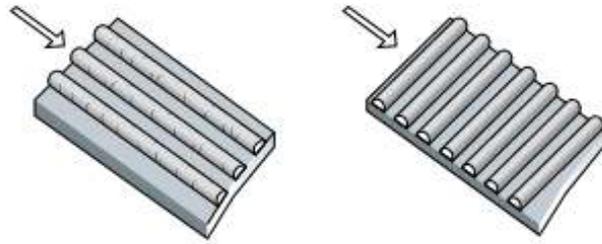


Figure 6 : Passes déposées à intervalles réguliers[11]

➤ **Passes en quadrillage:**

La réalisation de cordons de soudure en croisillons permet d'obtenir un quadrillage (voir figure (7)). Les cordons sont orientés suivant des angles variant entre  $30^\circ$  et  $90^\circ$ . Ce type de motif est largement utilisé pour lutter contre l'abrasion impliquant des abrasifs de petites et grandes dimensions (ex : sable avec gravier et roche). Du fait de la disposition des cordons, l'abrasif fin se dépose dans les interstices et protège le métal de base des abrasifs de taille plus conséquente (phénomène d'autoprotection par colmatage). Plus l'espace non rechargé est petit, plus les particules fines, par adhérence, protégeront les surfaces de l'abrasion.



Figure 7 : Passes en quadrillage[12]

➤ **Points de soudage :**

En cas d'abrasion faible ou modérée, nous retrouvons ce rechargement dur lorsque le métal de base est sensible à l'apport de chaleur généré par le soudage (ex : aciers au manganèse).

La procédure de soudage implique de débiter le rechargement par le centre de la pièce pour, ensuite diffuser les autres points autour. Cela permet de limiter et de répartir les contraintes de soudage dans la pièce à recharger.

L'intervalle entre les points dépendra de la dimension de l'abrasif. Plus l'abrasif sera fin, plus la distance entre points sera minime.

### 1.6.Fissures de retrait

Les rechargements avec phases dures (carbures, borures, etc.) sont particulièrement sensibles au phénomène de retrait générant des fissures. Celles-ci témoignent d'une relaxation naturelle des contraintes du dépôt et permettent d'éviter les risques d'arrachement brutal à l'utilisation, sans affecter négativement la résistance à l'usure du dépôt.

Ces fissures de retrait, comme le montre la figure (8), sont transversés au cordon de soudure et espacées à intervalles réguliers. En cas de sollicitation aux chocs/impacts, il

est important de veiller à ce que ces fissures ne se propagent pas au métal de base. Il sera alors nécessaire d'appliquer une couche tampon spécifique permettant de faire barrière à la fissuration.[12]

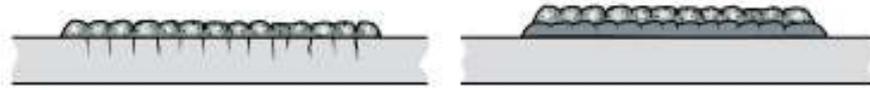


Figure 8 : Fissures de retrait

Il est crucial de différencier les “fissures de retrait” à celles dites “de fragilisation”. En effet, ces dernières se présentent sous forme de faïençage et peuvent entraîner un arrachement de matière et donc une perte de protection. De la même manière, les fissures longitudinales sont à éviter car elles témoignent d'un soudage défailant. Si besoin est, il est possible d'éliminer la fissuration de certains métaux d'apport. Pour ce faire, il sera nécessaire de préchauffer la pièce de manière suffisante et de respecter des vitesses de refroidissement maximales.[12]

### 1.7. Température de préchauffage:

La nécessité d'un préchauffage avant soudage dépend du type de métal de base. Ainsi, les industries ayant recours au rechargement dur utilisent majoritairement des aciers non-alliés, faiblement alliés, fortement alliés et au manganèse.

Dans le cas d'un métal de base austénitique à 11-14 % de manganèse, le préchauffage est à proscrire. En effet, en cas de température en cours de soudage excessive (> 150°C), le risque de fragilisation est important

Pour les autres aciers, la réalisation d'un préchauffage avant soudage a plusieurs intérêts :

- Adoucir la structure de la zone affectée thermiquement en ralentissant la vitesse de refroidissement.
- Garantir une zone affectée thermiquement à structure non trempée.
- Répartition des contraintes après soudage du fait d'un refroidissement plus lent.
- Le refroidissement lent permet aussi un dégazage de l'hydrogène.
- Permet d'augmenter la pénétration avec le métal de base et donc la force d'accrochage au substrat.[13]

Afin de déterminer la température de préchauffage, il est primordial de connaître la composition chimique du métal de base, ainsi que l'encombrement et l'épaisseur de la pièce à souder.

Ces deux derniers facteurs influent sur l'écoulement de chaleur : tridimensionnel ou bidimensionnel. Sur une pièce très massive, bien que le carbone équivalent soit faible, un dégourdisage sera imposé de manière à limiter la vitesse de refroidissement et un risque de “trempe”.

La présence de carbone, ou de certains autres éléments d’alliage, a une influence directe sur la température de préchauffage. Détermination de la température de préchauffage par le carbone équivalent (Ceq) du métal de base.

$$C_{eq} = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Cr + \% Mo + \% V}{5} + \frac{\% Ni + \% Cu}{15}$$

Le tableau suivant permet d’avoir une vision approchante du préchauffage à réaliser en fonction du métal de base.

Tableau 2 : Température de préchauffage en fonction du métal de base: [13]

Carbone équivalent	Soudabilité	Préchauffage	Post chauffage
Ceq < 0.35	Bonne	Dégourdissage	Non nécessaire
0.35 < Ceq < 0.6	Acceptable	150 – 250°C	Préférable
Ceq > 0.6	Sous réserve de précautions	< 250	Nécessaire

Les rechargements durs ne présentant aucune ductilité, des fissures de retrait apparaissent fréquemment. Ainsi, si on souhaite minimiser la présence de fissures, le préchauffage pourra alors être déterminé en fonction du métal d’apport utilisé. Dans certains cas, même si le métal de base type C-Mn a un Ceq < 0.35, l’utilisation d’une base cobalt (STELLOY 6) nécessite un préchauffage minimum de l’ordre de 300-350°C. De plus, afin d’éviter la fissuration du métal déposé, un refroidissement lent sera nécessaire.

Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer la température de préchauffage de manière théorique. Nous retiendrons la formule de SEFERIAN suivante :

$$T^{\circ} \text{Préchauffage} = 350 \sqrt{(C) - 0,25}$$

(C) représente le carbone équivalent total. Il est la somme du carbone équivalent chimique (Cc) et du carbone équivalent épaisseur (Ce).

0,25 correspond à la limite supérieure de carbone pour les aciers ordinaires soudables.[13]

$$(Cc) = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 Mo}{90}$$

$$(Ce) = 0,005 \times (\text{Épaisseur substrat en mm}) \times (Cc)$$

$$(C) = (Cc) + (Ce)$$

### **1.8.Choix du consommable de rechargement dur :**

#### **La désignation normalisée suivant EN 14700 :**

Les “produits consommables pour le rechargement dur”, devant résister à des usures de multiples types, sont classifiés selon des désignations normalisées. Ces désignations spécifient notamment la composition chimique du métal fondu hors dilution des fils et baguettes fourrés.

La composition chimique des métaux d’apport permet aux utilisateurs avertis de saisir rapidement la fonctionnalité du produit. En effet, chaque élément d’alliage ou combinaison d’éléments a une fonctionnalité ; que ce soit pour la soudabilité mais aussi et surtout pour les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques du dépôt.

Dans la pratique, lors du choix de métal d’apport, il convient de déterminer les raisons de l’ajout d’un élément. Pour faire le choix le plus approprié et répondre le mieux au besoin, cette étape est nécessaire.[14]

#### **1.9.Classification en familles de produits :**

Depuis les années 1940, le nombre d’écrits relatifs au sujet “Rechargement dur / Hardfacing” a considérablement augmenté. Afin de faciliter les explications relatives à ce sujet, les auteurs ont pris pour habitude de diviser l’ensemble des métaux d’apport en quatre familles de produits.

Les bases fer sont scindées, de manière assez arbitraire, en deux parties :

- les alliages comprenant moins de 20 % d’éléments d’addition.
- 1 les alliages comprenant plus de 20 % d’éléments d’addition.

La troisième famille de produit concerne les rechargements durs non-ferreux et est représentée majoritairement par les bases cobalt et nickel. Enfin, le quatrième groupe correspond aux alliages avec carbures de tungstène.[15]

- Groupe n° 1 : Base fer à moins de 20% d’alliage.
- Groupe n° 2 : Base fer à plus de 20% d’alliage
- Groupe n° 3 : Alliage non-ferreux, base cobalt ou nickel.
- Groupe n° 4 : Alliage avec carbures de tungstène.

#### **1.10.La projection thermique :**

Selon la nature du matériau projeté (poudre ou fil), le type de source d’énergie (flamme ou électricité), les procédés de projection thermique utilisés dans le rechargement durs sont généralement les suivants :

➤ **Projection flamme avec refusion :**

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

Les dispositifs utilisés sont les torches à gaz avec lesquelles les opérations de projection et de refusions sont réalisées simultanément. La refusions est alors réalisée soit à l'aide d'une torche oxyacétylénique ou oxy-propane, soit à l'aide d'un dispositif à induction [8]. Les poudres utilisées sont les carbures de chrome ou de tungstène liés par du nickel ou du cobalt, l'alumine ou l'oxyde de chrome. Les dépôts obtenus ont l'avantage d'être très compacts (porosité inférieure à 1%), d'avoir une bonne adhérence. L'épaisseur du dépôt reste en général inférieure à 0,2 mm. Les domaines de l'aéronautique, la sidérurgie, la chimie ou le textile utilisent ce procédé assez contraignant par ses dimensions et ses nuisances sonores.[15]

➤ **Projection à l'arc électrique :**

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils dégageant une énergie thermique importante d'environ 6000°C, variant selon le matériau utilisé et l'intensité choisie, ce qui fait fondre le métal des fils, un jet d'air comprimé situé dans l'axe du point de création de l'arc, pulvérise le métal fondu sur le substrat [8.9]

Les dépôts ont une épaisseur de 0,2 à 3 mm avec une porosité de 5 à 10%. Les matériaux projetés doivent être conducteurs. L'avantage du processus de projection à l'arc fil reste indéniablement son taux de déposition élevé le rendant parfait pour les grandes régions ou pour les applications de production de grand volume. [9]

**Projection au plasma atmosphérique (APS) :**

Un plasma gazeux est initié par un arc électrique confiné (12 000 à 20 000 °K). Il est étranglé dans une tuyère d'où il s'échappe avec une vitesse élevée. On injecte alors la poudre dans ce jet de plasma grâce à un gaz porteur en général de l'argon. Les particules fondent et sont projetées sur le substrat par ce jet de gaz. [8]. Un intérêt de cette technique réside dans la diversité de substances projetables. Ainsi les métaux, les alliages, les céramiques, les carbures et les cermets peuvent être utilisés.[16]

### 1.11. L'usure :

**Définition :**

On définit l'usure comme une détérioration progressive due à une utilisation prolongée ou trop fréquente.

L'usure altère l'état de la pièce ayant pour conséquence finale une perte de qualité.

Ce phénomène entraîne donc pour l'utilisateur :

- une baisse de rendement et de longévité
- une augmentation des risques relatifs à la sécurité des biens et des personnes

- une augmentation en consommation d'énergie

L'ensemble de ces facteurs peut engendrer une perte économique lourde.

Il est alors impératif de prendre en compte le phénomène d'usure dans la vie du produit : prévoir pour mieux contrôler. La qualité des services de maintenance et de réparation est donc la clé du succès de votre exploitation.

Nous verrons ainsi dans cet ouvrage l'importance des rechargements durs, utilisés à titre préventif ou curatif.[17]

## CHAPTIRE 2

## USURE DES MATERIAUX

**2.1. Les différents types d'usure**

Dans ce chapitre, nous n'évoquerons que les types d'usure ou le rechargement dur est généralement appliqué.

**2.1.1. Abrasion faible ou modérée / faible impact :**

Cette forme d'usure r résulte d'un c contact par frottement / glissement de particules sur le substrat (voir figure 9). La pression de ces abrasifs étant très faible, ils ne changent pas de dimensions et ne cassent pas. L'angle d'attaque de ces particules étant quasi-nul, on parle parfois de "micro-usinage".

D'un point de vue technique, on utilise les termes :

- "Abrasion faible" lorsque deux corps sont impliqués (l'abrasif et le substrat).
- "Abrasion modérée" lorsque trois corps interviennent (2 surfaces en mouvement relatif avec un abrasif entre deux).[17]

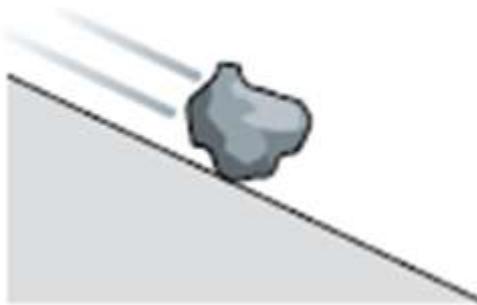


Figure 9 : Abrasion modérée

Plus les abrasifs n'auront une forme aiguisée et une texture dure, plus le taux d'abrasion sera importante. Nous verrons, ultérieurement, un tableau référençant les duretés des abrasifs.

Étant donnée l'absence d'effet d'impact, la ductilité du substrat n'est pas un facteur essentiel. Un rechargement (mono- ou polyphasé) ayant une dureté suffisamment élevée par rapport à l'abrasif suffira donc. Ainsi, en plus des tôles rechargées, nous retrouvons

les solutions employant des céramiques ainsi que des tôles traitées thermiquement (ex : 400 HB).

La figure (10) en montre des exemples pratiques.



Figure 10 : Tôles de transport

### 2.1.2. Abrasion forte / sous-pression

L'abrasion sous forte pression apparaît sur les équipements où l'abrasif est comprimé entre deux surfaces (voir figure 11). Ce dernier est alors brisé en de multiples morceaux. Du fait de cette forte pression, l'usure de la surface se traduit par la formation de copeaux voir même d'arrachement, de déchaussement de phases dures (carbures, borures, etc.) ou encore de déformation plastique de la matrice.

Le choix d'une solution de rechargement se fera donc en sélectionnant un matériau proposant une forte limite élastique (combiné à une forte ductilité) et ayant des duretés assez élevées. Ceci afin de répondre à la sollicitation en pression et frottement.[17]

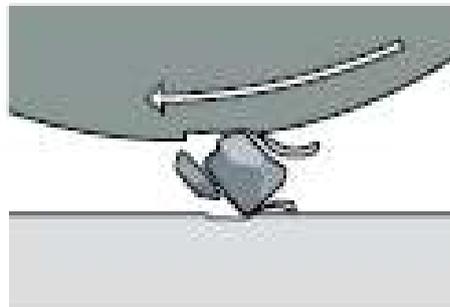


Figure 11: Broyeur à charbon

### 2.1.3. Abrasion sévère / fort impact :

On parle également "d'abrasion par gougeage". Il s'agit, en fait, d'une abrasion faible, modérée ou forte combinée à un effet d'impact. Cette usure implique la suppression de gros copeaux et de rayures sur la surface impactée. Il est possible que des déformations plastiques accompagnent ce phénomène.

Du fait de ces sollicitations, il est préconisé d'utiliser des matériaux ductiles et résistant à l'impact et aux chocs. Dans la pratique, nous distinguerons les chocs des impacts. En effet, la force induite par un choc est répartie ponctuellement sur la surface ; alors que, pour les impacts, les points de contact avec le substrat sont multiples. Ainsi, les aciers au manganèse seront fréquemment utilisés en cas de choc répétitif et les alliages à

carbures de titane apporteront, elles, une réponse idéale aux impacts. La figure (12) montre un exemple d'un marteau de broyeur. [15]

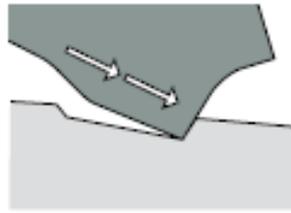


Figure 12 : Marteau de broyeur

#### 2.1.4. Adhésion / friction :

Lorsque deux corps métalliques frottent l'un contre l'autre, et qu'il y a transfert de matière d'un substrat à l'autre, on parle "d'usure par adhésion".

Ce type d'endommagement apparaît lorsque trois éléments sont réunis : température, pression et friction.

Le contact des aspérités entre elles, accompagné d'un mouvement relatif, induit une micro fusion immédiatement arrachée par cisaillement.

Les aspérités ne sont pas forcément visibles à l'œil nu. Ce mécanisme d'usure se produit donc à l'échelle microscopique.

Le taux d'usure par adhésion dépend directement de plusieurs facteurs : pression exercée entre les deux pièces, vitesse de friction, température de l'environnement de travail, surface de contact, propreté des faces de frottement, coefficients de friction en surface.[18]

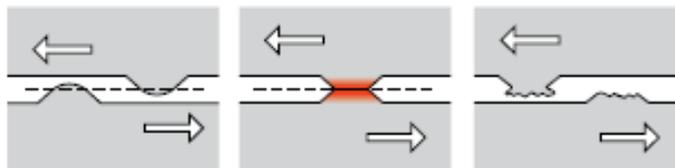


Figure13 : adhésion/friction

La nature du matériau utilisé a, elle aussi, une influence. Aussi, l'utilisation de deux matériaux aux structures cristallographiques identiques aura tendance à augmenter le risque d'adhésion.

#### 2.1.5. Érosion

L'usure par érosion est fortement assimilable à l'abrasion. En effet, cette usure apparaît lorsque des particules solides ou liquides rentrent en contact avec la surface du substrat.

Le taux d'usure est alors directement lié à l'angle d'attaque de l'élément extérieur et à la vitesse à laquelle il est projeté. Ainsi, suivant les propriétés physiques du substrat, l'érosion sera plus ou moins importante.

En effet, à faible angle d'attaque (environ 10 et 30°), le phénomène d'érosion apparaît du fait d'un micro-usinage comparable à l'abrasion faible ou modérée. Ainsi, dans ce cas, le taux d'usure dépend directement de la dureté du substrat.

A des angles d'attaque plus importants (environ 30 à 90°), les particules érosives ont pour effet de déformer, voir même d'écailler le substrat. Il est alors nécessaire d'utiliser des matériaux capables d'absorber l'énergie engrangée par l'impact sans induire de déformation ni de fissure. La figure 2.6 montre un cas où l'usure érosive est impliquée.

[17]

Exemple :.

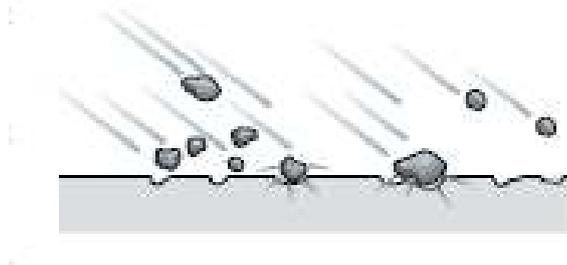


Figure 14 : Erosion d'un équipement de dragage [18]

### 2.1.6. Cavitation :

La cavitation apparaît lorsqu'un liquide subit un fort changement de pression. Cela entraîne alors la création de nombreuses bulles de gaz. En contact avec une paroi solide, ces bulles implosent et créent alors un effet d'usure par cavitation. On parle aussi "d'érosion cavitation". (voir figure 15) [18]

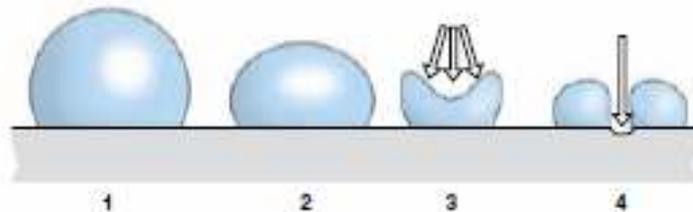


Figure15 : étapes de la création de cavitation

Ce phénomène répété provoque des contraintes cycliques et une fatigue du métal de base. Des fissures de fatigue conduisent alors à des décohésions de matière.

Dans ces conditions de sollicitations, les matériaux proposant de bonnes résiliences montrent une meilleure résistance à ce type d'usure. Et ce, en dissipant l'énergie induite de l'implosion des bulles.[17]

*Exemple : pales de turbine hydroélectrique.*

### 2.1.7. Fatigue thermique :

Ce type de fatigue fait référence à une usure générée par des cycles thermiques contraignants pour le métal de base. En effet, le fait de chauffer puis refroidir la pièce d'une manière cyclique entraîne des dilatations et compressions. Ces contraintes ont pour conséquence directe la création de fissures sous forme de faïençage dites "fissures de fatigue".

Exemple : Outils de forge, rouleau de laminage à chaud. (voir figure 16).

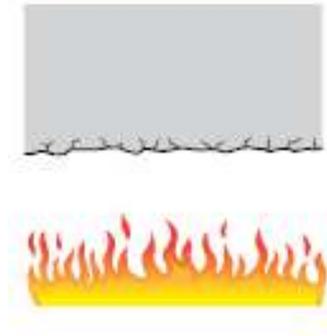


Figure 16 : Fatigue thermique [17]

### 2.1.8. Fatigue de contact / fretting :

Les phénomènes d'usure étudiés précédemment conduisaient à une perte de matière régulière. La "fatigue de contact" se produit lorsqu'il y a une action de roulement ou de glissement entre deux éléments et de manière cyclique. Dans ces conditions, on peut constater un soudain manque de matière sous forme de piqûres ou d'écaillages. Les pièces sollicitées en glissement ou roulement sous forte pression subissent des contraintes mécaniques importantes. Des fissures peuvent apparaître [18] (voir figure 17).



Figure 17 : création des fissures lors d'une fatigue de contact [18]

Ces contraintes sont responsables de leurs propagations jusqu'à provoquer des décohésions ou des arrachements.

*Exemple : dent d'engrenage, rails, presses à rouleaux.*

### 2.1.9. Corrosion :

L'usure par corrosion est un domaine vaste et complexe. Pour y répondre, on utilisera des solutions de rechargements nobles "Cladding". Les aciers inoxydables austénitiques (série 300) ainsi que les bases nickel sont privilégiés. Lors des essais de qualification soudage, ce type de rechargement doit respecter certaines exigences, notamment des pliages coté à 180° exempts de fissures. Les rechargements durs (hardfacing) ne

nécessitent pas ce type d'essais. En cas de rechargement dur, la corrosion n'est pas prépondérante et est combinée à un autre type d'usure.[18]

Exemple :

Vis sans fin en papeterie, montré à la figure (18) (base nickel avec addition de carbures de tungstène) ou encore rouleaux décollée continue rechargés (dépôt inoxydable martensitique).



Figure 18 : Vis sans fin corrodée

#### 2.1.10. Usure combinée :

Dans le cadre de certaines applications, les équipements subissent de multiples contraintes. On observe alors une combinaison de différents types d'usure. Dans la majorité des cas, la corrosion et/ou la température viennent s'additionner à un autre type d'usure : on parle de facteurs secondaires. Il faut alors prendre en considération les multiples sollicitations afin de sélectionner le consommable de soudage le plus adéquat.[18]

## Chapitre 3

### Etude expérimentale

#### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux différentes étapes permettant la réalisation du rechargement des substrats en acier ordinaire avec les différentes poudres qu'on a choisis ainsi que la description des techniques de caractérisation utilisées, suivant un protocole expérimental décrit en deux étapes principales:

#### 3.2) Choix des matériaux

Le matériau utilisé dans cette étude comme substrat est un acier ordinaire XC10, Cette acier a été choisi pour sa disponibilité (au niveau de l'atelier de soudage) sous forme de tôle de 4 mm qui est très pratique pour réaliser nos revêtements et pour son prix qui est très bas en comparant avec les autre nuances d'aciers alliés.



Figure 19 : Forme des tôles utilisées

L'acier ordinaire est utilisé en mécanique générale grâce à sa bonne usinabilité et ses bonnes caractéristiques mécaniques.

#### a) Alliages de rechargement

##### Poudre:

Les poudres utilisées dans le cadre de ce projet disposants des propriétés très intéressantes en termes de résistance à l'usure, à l'érosion et à la corrosion :

- Poudre d'un alliage de : C-B-Si-Fe-Ni-Cr, Elle est désigné par "8435PE".
- Poudre d'un alliage de : C-Cr-Fe-B-Si-Ni, Elle est désigné par "Eutalloy 10009".

Les propriétés et la nature chimique de poudres utilisées dans le cadre de ce projet ont été relevées à partir des documents des fabricants, ils sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 1 : Les caractéristiques des poudres utilisées :

Poudres	composition	Dureté	caractéristiques
8435PE	Alliage de NiSiFeBCrC.	34HRC	-Densité apparente : 4,1G/Cm <sup>3</sup> . -Granulométrie 32-125 µm. -Densité alliage fondu : 13,8 G/Cm <sup>3</sup> .
Eutalloy 10009	Alliage de SiCrCFeNiB	63 HRC	-Bonne résistance a l'abrasion. - Très bonne résistance a la haute température. -Très bonne résistance a la corrosion. -T° de service max : 700 °C.

Les compositions chimiques des poudres sont résumées au tableau 4 et 5.

Tableau 2 : Composition chimique (% massique) de la poudre " 8435PE ":

C%	B%	Si%	Fe%	Ni%	Cr%	Autres%
0,3	1,2	3,7	2,5	RESTE	7,5	0,1

Tableau 3 : composition chimique (%massique) de la poudre " Eutalloy 10009 "

C%	Cr%	Fe%	B%	Si%	Autres%	Ni%
<0,6	15,2	4	3,2	4	<1,7	RESTE

**b) Fils**

On a utilisé un fil fourré sans gaz spécialement développé pour la réparation et la maintenance ( y compris sur chantier ). Il est désigné sous le nom de TeroMatec® 4327 de Castolin Eutectic .

Il permet d'intervenir sur de grosses pièces nécessitant des taux de dépôt plus important qu'avec des électrodes enrobées traditionnelles. La composition chimique du fil fourré est donnée au tableau 6.

Tableau 4 : Les composant du file utilisé

C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	Nb%	Ti%	Fe%
0,9	3	1,8	6	1,5	3	0,45	RESTE

### 3.3 Préparation des échantillons

#### a) Découpage des échantillons :

Les échantillons, sous forme de plaquette rectangulaire de dimensions de (25-35) mm x (25 35) mm et de 4mm d'épaisseur, ont été découpés à l'aide d'une guillotine du département de mécanique montrée à la figure (20).



Figure 20 : La guillotine

#### b) Préparation des surfaces:

##### 1) Meulage :

Dans l'atelier soudage on trouve souvent des pièces corrodées dont la surface est affectée par le milieu extérieur (oxydation). Nous avons utilisé une meule pour éliminer la couche extérieure d'oxydes présente sur la surface des substrats. A la fin de l'opération, il n'y avait plus d'oxydes apparent en surface.

##### 2) Grenailage :

L'adhésion des revêtements réalisés par projection thermique est basée principalement sur l'accrochage mécanique, donc pour une meilleure adhérence du dépôt au substrat

(plaquette). Cependant, dans notre cas, le grenailage a été utilisé améliorer la préparation de surface notamment en terme de propreté et de dégraissage de la surface des substrats. L'augmentation de la rugosité de surface est obtenue par un lancement à grande vitesse des grains de tailles micrométriques de sables d'alumine ( $Al_2O_3$ ) contre l'échantillon à l'aide d'air comprimé sous une grande pression. Le grenailage a été réalisé au niveau du laboratoire LTSM. Une vue de la grenailleuse est montrée à la figure (22)., L'aspect des éprouvettes après l'opération de grenailage est montré à la figure (21).



Figure 22 : Grenailleuse



Figure 21 : Aspect des tôles après sablage

### c) Revêtements :

#### ❖ procédés de projection thermique à flamme

L'élaboration des revêtements a été faite par projection thermique à la flamme oxyacétylénique. Une torche à flamme de type fusion-refusion de Castollin Eutectic désigné par EutalloySuperJet a été utilisé pour l'exécution des revêtements sur les substrats en acier.



Figure 23 : Pistolet a flamme-poudre  
" kit Eutalloy "

6 échantillons ont été préparés dans le cadre de notre étude pour la projection à flamme poudre, 3 sont projetés avec la 1ère poudre "8435PE" et les 3 autres avec la 2ème poudre "etalloy 10009" afin d'étudier l'influence de nombre de passes (couches) sur la microstructure et les propriétés mécaniques des revêtements.

Les paramètres de projection utilisés lors de la projection sont présentés dans le tableau 7

Tableau 7 : Paramètres de projection thermique de l'Eutalloy :

Débit d'oxygène	90 à 1200 NI / h
Débit d'acétylène	80 à 1100 NI / h
Pression d'oxygène	1.5 à 2.5 bars
Pression d'acétylène	0,5 à 0,6 bar
Distance de projection	30 – 40 mm
Angle de projection	90°
Distance de la refusions	15 – 20 mm
Angle de refusions	45°

#### ❖ Rechargement par soudure

Dans cette partie, nous avons utilisé un appareil semi-automatique de type MIG et qui est dénommé TEROMATEC de Castolin Eutectic. Le TeroMatec® est un procédé de soudage à l'arc sans gaz dit open arc utilisant des électrodes fils fourrés spécialement élaborés

pour offrir à l'industrie des solutions uniques de protection contre l'usure, de rechargement et de réparation. Les principaux avantages et bénéfices du procédé TeroMatec® sont :

- Une extrême mobilité
- Des taux de dépôt plus élevés
- Un exceptionnel facteur de marche
- Un meilleur rendement effectif
- Une réduction des quantités stockées
- Utilisation d'équipements simples Des économies accrues

La figure 24 montre schématiquement le principe de soudage avec le TEROMATEC.

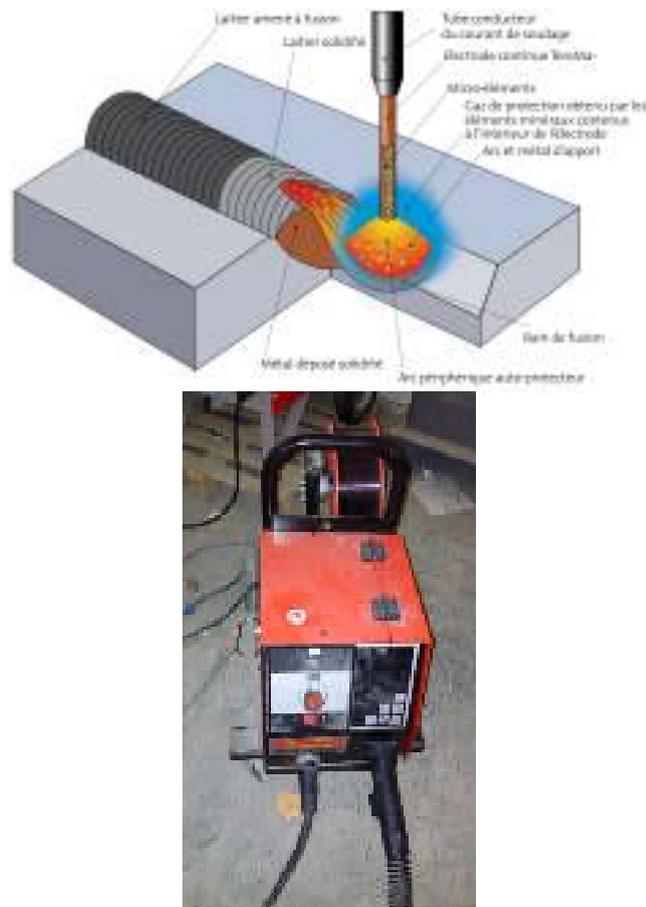


Figure 24 : Appareil du soudage TEROMATEC.

**d) Préparation métallographique :**

**Tronçonnage :**

La caractérisation microstructurale et mécanique des revêtements a nécessité la réalisation de petits échantillons. La coupe consiste en un tronçonnage précis à l'aide

d'une micro-tronçonneuse IsoMet®1000 de BUEHLER (figure .25). Il s'agit d'obtenir des échantillons représentatifs avec une surface plane, et de limiter les déformations.



Figure 25 : micro tronçonneuse

#### **Enrobage :**

Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation des échantillons et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. L'enrobeuse permet d'enrober les échantillons dans une résine thermodurcissable. La figure (26) montre une photo de l'enrobeuse utilisée MECAPRESS II de marque PRESI.



Figure26: Enrobeuse

#### **Polissage :**

Les techniques de caractérisation utilisées nécessitent un polissage fin de la surface ou de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique, obtenu manuellement dans notre cas, vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abrader la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) de grade

progressif (papiers abrasifs de ,80, 280, 400, 600, 800) montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est d'environ 150tr/min.

**Attaque chimique :**

En général on effectue une attaque chimique pour révéler la structure, notamment les joints de grain. On utilise fréquemment des acides forts ou des procédés électrochimiques , Nous avons utilisés les réactifs énumérés au tableau 8.

Tableau 8 : Réactifs d'attaque :

Elément à attaquer	Nom de réactif	Prélèvement en ml	Durée et température
ACIER	Nital	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH 96 %100 HNO <sub>3</sub> : 1.42	7 à10 s 20°C
P1	Acide oxalique (attaque électrochimique)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4 à 8 s 20° C
P2	Acide oxalique (attaque électrochimique)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4 à 8 s 20° C
SOUDAGE	Villela 's	Acide picrique: 1g HCl: 5ml ETHANOL: 95ml	60 s 20°C

**3) Moyens de caractérisations**

**a) Microscope optique :**

L'analyse microscopique a été effectuée avec un microscope de type ZEISS AXIOVER T40 MAT montré dans la figure (27) dont le principe consiste à faire réfléchir la lumière sur la surface polie de l'échantillon dans le but d'observer les couches existantes sur cette dernière.



Figure 27 : Microscope optique

**b) Techniques de caractérisation mécaniques :****Essais de dureté/micro-dureté Vickers :**

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). Dans le cadre de notre projet nous avons mesuré la moyenne de la micro-dureté des 3 échantillons avec une charge 980.7 mN pour une durée de pénétration égale à 10 secondes. La figure ci-dessous montre le microdurometre Vickers HMV-2 SHIMADZU utilisé pour mesurer la micro-dureté de nos revêtements.



Figure 28 : Microdurometre HMV-2 SHIMADZU

**Erosion :**

L'essai d'usure érosive consiste à projeter à grande vitesse du sable sur un échantillon placé à un angle bien précis. L'action continue des grains de sable entraîne une perte de matière qui permet d'évaluer la résistance à l'érosion de l'échantillon. Une représentation schématique du montage d'érosion est montrée à la figure (29).

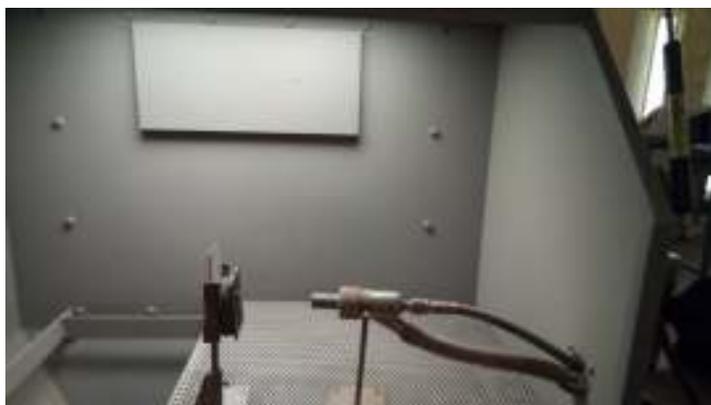


Figure29: Montage pour l'essai d'érosion.

Le montage porte échantillon est placé dans une enceinte métallique fermée qui permet de récupérer le sable déjà utilisé. Il permet de changer les angles de projection et les distances buse-éprouvette.

Les conditions expérimentales de l'essai d'érosion sont résumées au tableau 9. Les échantillons sont nettoyés à l'acétone dans un bain ultrasonique et séchés à température ambiante pendant 30 minutes. La masse des échantillons est mesurée avec une précision de 0.1 g avant et après chaque test.

La méthode qu'on a suivi est la suivante :

- Soufflage d'échantillon par l'air comprimé avant le teste et le faire peser.
- Réaliser le teste de perte de masse avec les paramètres trouvé dans le tableau.
- Après le teste en va de nouveau souffler l'échantillon.
- En fin, On va peser l'échantillon et calculer la différence de perte de masse pour déterminer le taux d'érosion.

Tableau 9 : Paramètres de l'essai d'érosion :

Sable	Corindon
Diamètre de la buse	4 mm
Angle	90°/45°
Distance	10 cm
Pression	5 Bar
Temps	10s
Taille de grains	128

## Chapitre 4

### Résultat et discussion

#### 4.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation des principaux résultats obtenus dans le cadre de notre étude suivi d'une discussion et des interprétations afin d'établir des relations entre les microstructures et les propriétés mécaniques tout en prenant en compte le procédé de déposition et technicité avec laquelle ces revêtements ont été réalisés.

#### 4.2 Projection à flamme-poudre

Notre étude consiste à prospecter l'influence de nombre de passes ou de couches des revêtements déposés par soudage MIG ou torche Eutalloy sur ses propriétés mécaniques finales.

##### 4.2.1) Aspect de surface des différents revêtements réalisés

Après plusieurs essais préliminaires infructueux, nous avons réussi à cerner les paramètres opératoires optimales des poudres P1 / P2. La figure 30 montre les aspects de surface des deux différents revêtements. Les surfaces sont lisses et ont un bel aspect.



Figure 30 : Aspect surfacique des revêtements par flamme-poudre

#### 4.2.2) microstructure et épaisseur des dépôts

Des essais de mesure d'épaisseur et de microdureté ont été réalisés sur les éprouvettes déposées par projection à flamme et ceux pour la poudre 8435PE à base de NiSiFeBCrC. Nous remarquons que la dureté augmente progressivement avec l'épaisseur du revêtement. La coupe transversale du revêtement montre les différentes couches déposées. La première couche est la plus épaisse, la deuxième et la troisième couche semblent avoir la même épaisseur, moins d'une centaine de microns.

##### Poudre 1 :

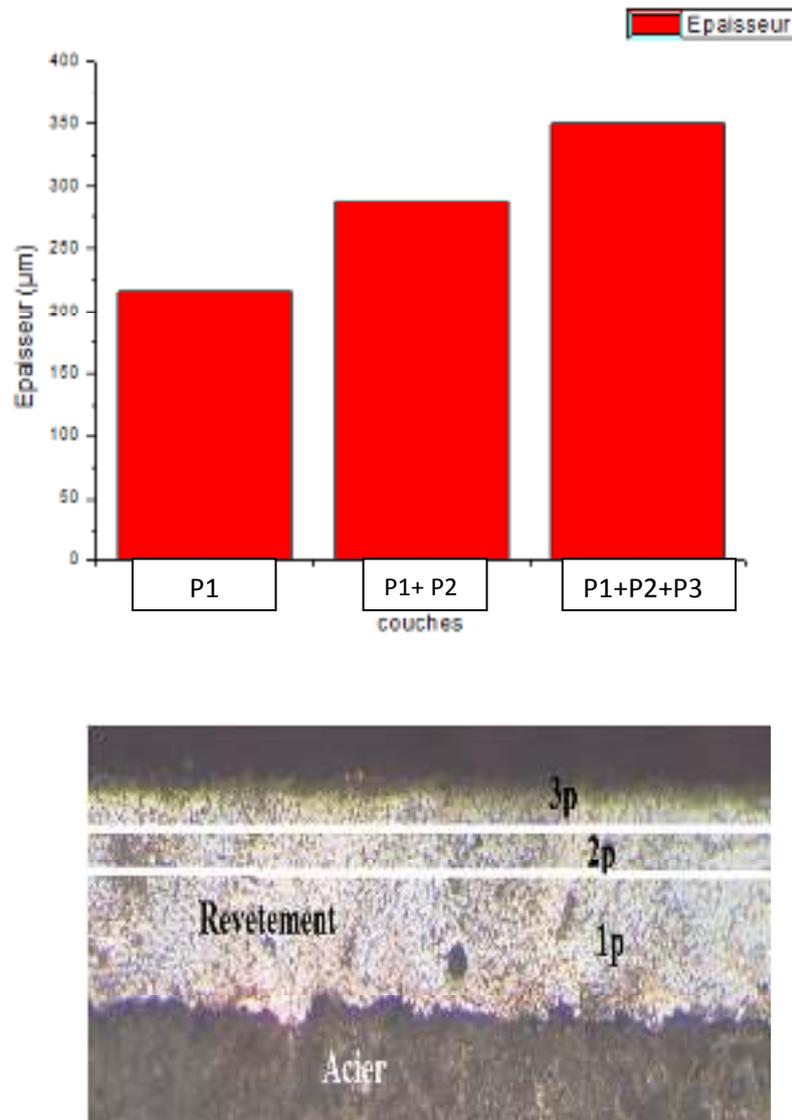


Figure 31 : (a) épaisseur du dépôt de poudre 1 (b) : Dépôt de la poudre 8435PE à base de NiSiFeBCrC.

Les couches sont denses et pratiquement sans aucune porosité. Ceci est dû au procédé de refusion des couches fraîchement déposées qui répartit de manière uniforme la matrice de NiCr sur toute la surface. D'autre part, l'opération étant manuelle, il est difficile d'assurer une bonne reproductibilité de la déposition lors de la projection. En outre, notre manque d'expérience pratique ne contribue pas à atténuer cet effet.

### Poudre 2 :

Pour la poudre 10009 à base NiBSiCrCFe, les résultats d'épaisseur et de microstructure sont présentés à la figure .(32)

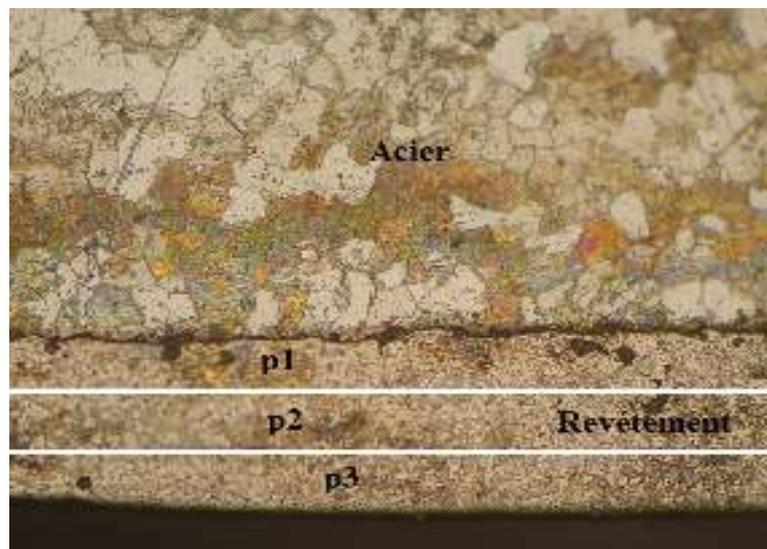
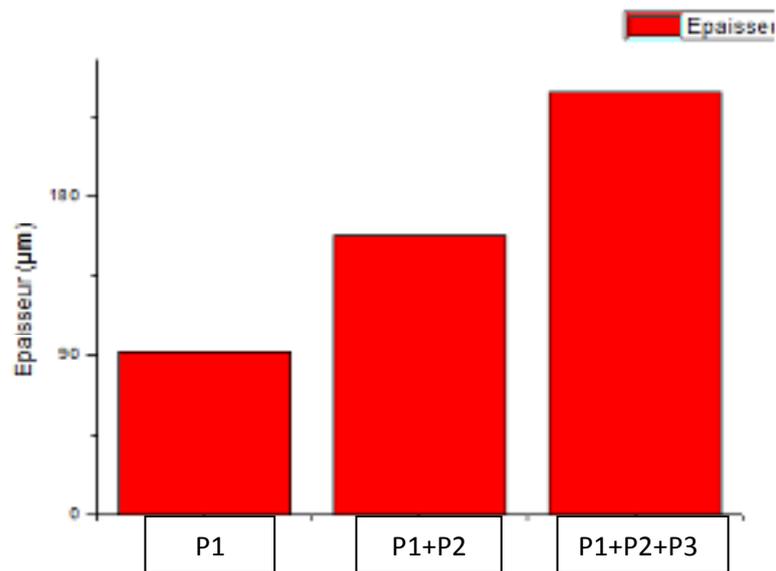


Figure 32 : Dépôt de la poudre 10009 à base NiCrBSiFeC

Dans ces expériences, la pratique manuelle commence à faire son effet. Les revêtements de chaque couche déposée ont relativement la même épaisseur (70  $\mu\text{m}$ ). La coupe transversale du revêtement confirme la qualité du revêtement tant au niveau de l'uniformité que la densité.

#### 4.2.3) Résultat de la microdureté

Pour cela, sur une coupe transversale du dépôt, six mesures du nombre de dureté ont été pratiquées sur toute l'épaisseur des dépôts. Une prise de micro-dureté du substrat a été réalisée pour fin de comparaison. Les figures 33 et 34 montrent les résultats de micro-dureté.

Nous constatons tout de suite qu'il y a un effet inverse de l'évolution de la microdureté en fonction du nombre de couches déposées. Cette évolution dépend de la composition de la poudre. La composition exacte de chacune des poudres est inconnue, on ne connaît que les principaux éléments la constituant et ce selon leur fiche technique fournies par Castolin Eutectic. La différence notable entre elles réside dans la présence du bore beaucoup plus importante dans la poudre commerciale 10009 que celle de la poudre 8435PE. La proportion du NiCr est aussi plus importante dans la poudre 10009. Ces informations recueillies auprès du fournisseur nous éclaire un peu plus sur les résultats obtenus.

Il est probable que les éléments carburigènes présents en plus grande proportion dans le revêtement 10009 réagissent mieux ou forment de carbures avec la déposition de passes successives et permettent donc d'avoir une micro-dureté plus importante que si le revêtement était déposé en une seule couche. Par contre, pour la première poudre 8435PE, ces éléments étant probablement beaucoup moins importants, la refusion ne fera que décomposer les carbures par l'apport supplémentaire de chaleur et par conséquent abaissera leur micro-dureté. Ce résultat est extrêmement important du point de vue pratique. En général, à la lumière de ces expériences, les poudres commerciales avec une forte proportion en éléments carburigènes auront de meilleures duretés si elles sont déposées en plusieurs couches. A l'inverse, celles dont la composition est appauvrie en éléments carburigènes, une seule couche est recommandée.

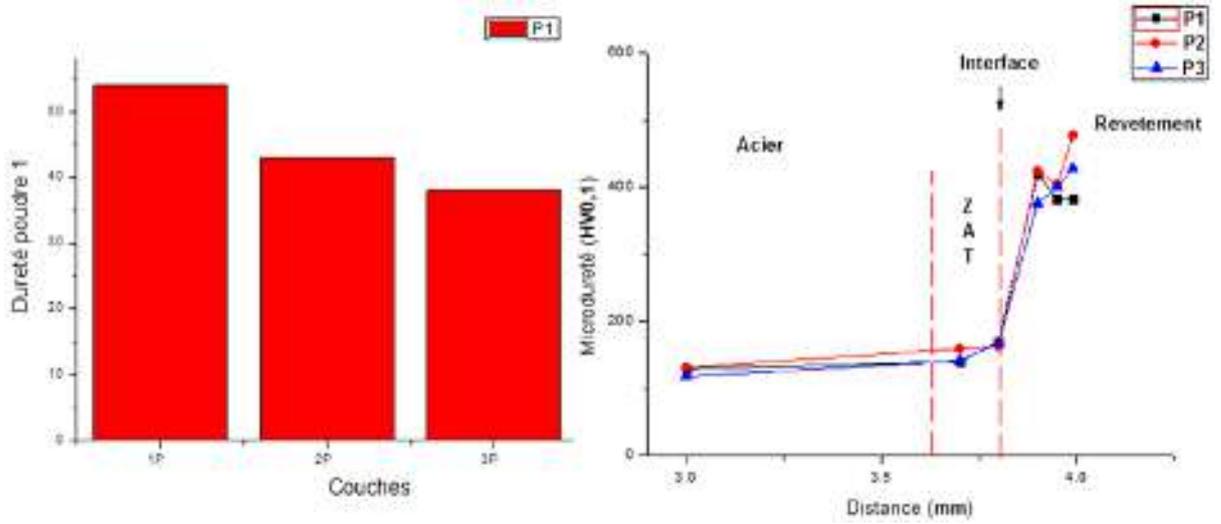


Figure 33: Micro-dureté du revêtement 8435PE à base de NiSiFeBCrC

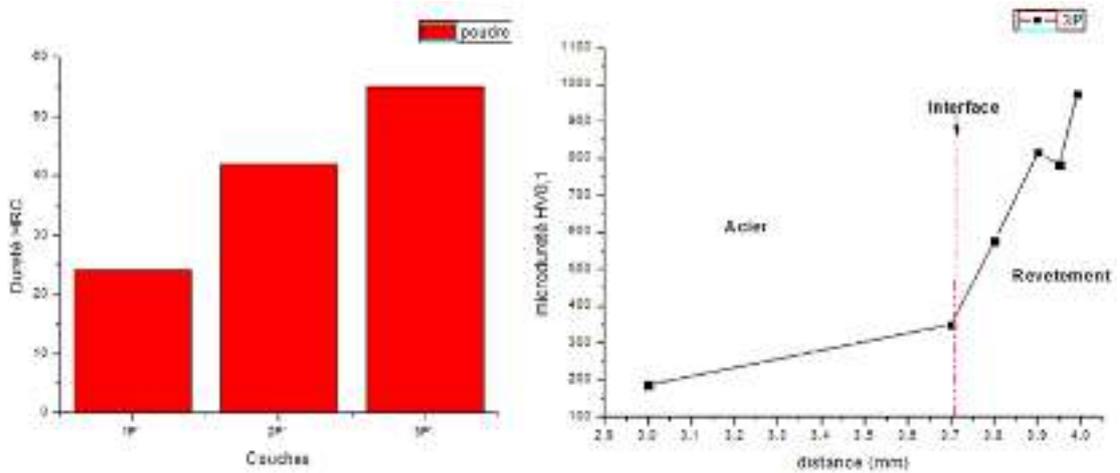


Figure 34: Micro-dureté du revêtement 10009 à base NiCrBSiFeC

#### 4.2.4 résultat du test d'érosion

Les essais d'érosion sont réalisés afin de mesurer leur résistance à l'usure abrasive à défaut de faire l'essai d'abrasion standard le G-65. Ces rechargements durs sont déposés pour résister ou améliorer la résistance à l'abrasion sous toutes ses formes. En pratique, c'est la composition de l'alliage que le revêtement est employé pour résister à une sollicitation bien spécifique. Il n'y a pas de composition universelle qui peut résister à toutes les formes d'abrasion. Les figures 35 et 56 montrent les résultats d'érosion faits sur les poudres 8435PE à base de NiSiFeBCrC et 10009 à base NiCrBSiFeC.

##### Poudre 1 :

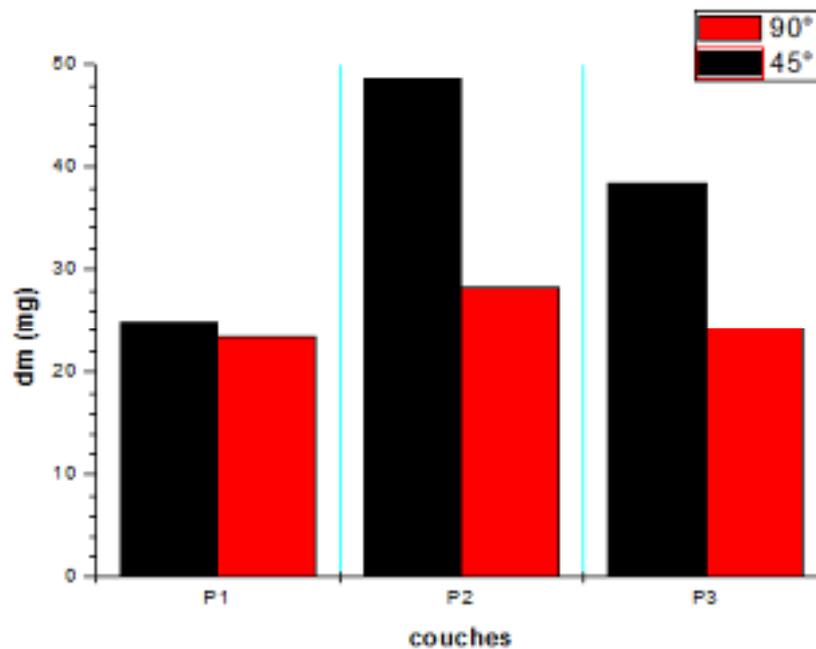


Figure 35 : Essai d'érosion de la poudre 8435PE à base de NiSiFeBCrC.

Les essais ont été réalisés aux angles d'attaque des particules abrasives à 45° et 90°. Ce sont des matériaux durs et c'est à partir de l'angle de 45° que l'usure devient prépondérante. Pour la poudre 8435PE à base de NiSiFeBCrC, le revêtement bâti avec une seule couche et donc avec la dureté, présente le meilleur comportement en érosion. Cependant, le revêtement bâti avec trois couches et donc présentant la plus faible dureté, a un comportement meilleur que celui bâti avec deux couches seulement. Il y a deux causes, selon nous et avec les données dont on dispose, qui pourraient expliquer cette différence:

1. la refusion de la dernière passe ne s'est pas faite correctement pour le revêtement bâti avec deux couches. Par conséquent, il est probable que l'attaque des particules abrasives s'est surtout concentré sur la matrice et non sur le composite matrice/carbures.

2. L'éparpillement des carbures ne s'est pas fait de façon uniforme durant la déposition à cause de notre manque d'expérience, ce qui a produit un revêtement qui n'est pas uniforme partout du point propriété mécanique.

Ceci montre que dans le cas de l'emploi du procédé de déposition avec refusion, une dextérité de l'opérateur est exigée si l'on veut arriver à des résultats reproductibles et acceptables.

Dans le cas de la poudre 10009 à base NiCrBSiFeC, la figure 36 montre les résultats des essais d'érosion réalisés à 45° et 90°.

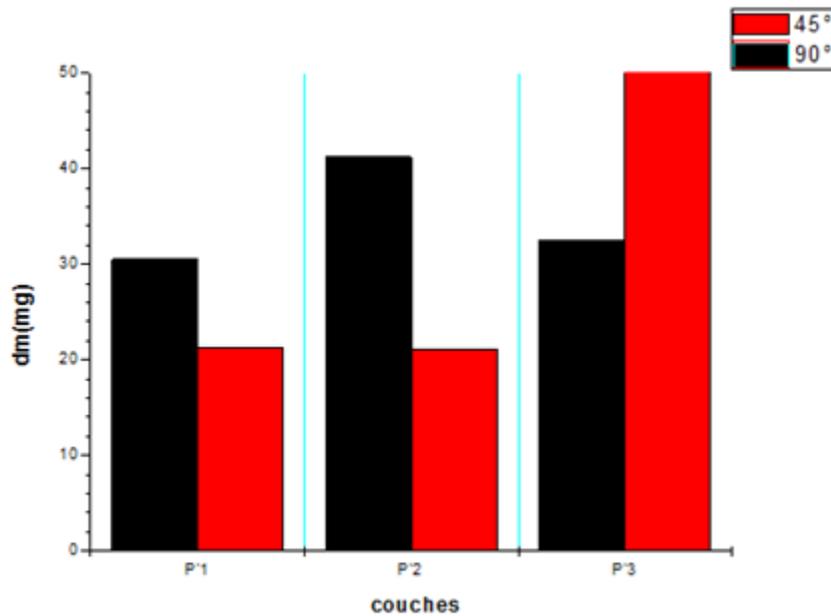


Figure 36 : Essai d'érosion de la poudre

Ces courbes sont assez étonnantes parce qu'elles ne respectent aucune logique. En effet, pour l'angle à 90°, c'est le revêtement bâti avec une couche, dont la dureté est 25 HRC qui présente le meilleur résultat. Celui bâti avec trois couches, ou la dureté de 55 HRC, sa résistance à l'érosion est la plus faible. Il est probable que le premier essai d'érosion pour le revêtement bâti avec une couche est à écarter car les données sont probablement erronées.

### 4.3 Rechargement par MIG

Dans cette section, nous allons détaillé les expériences réalisées avec l'équipement Teromatec de Castolin Eutectic. Ces expériences ont été faites avec une torche de type MIG sans apport de gaz lors de la déposition des revêtements. Le métal d'apport utilisé était un fil fourré qui ne nécessite pas de gaz et est destiné aux travaux sur chantier ou l'utilisation d'un gaz devient problématique. Il renferme un grand nombre d'éléments

carburigènes comme le Mn, Nb, Ti, Cr avec un pourcentage élevé de carbone. Après avoir optimiser les paramètres opératoires, le tableau 4.1 en donne les principaux.

Tableau 4 .1 : Paramètres de soudage

Diamètre (mm)	1,6
Ampérage (A)	180
Courant	Positive

4.3.1 Essais de dureté

Des mesures de dureté Rockwell C et des mesures de micro-duretés Vickers ont été réalisés sur les éprouvettes rechargées. Les résultats sont montrés à la figure 37.

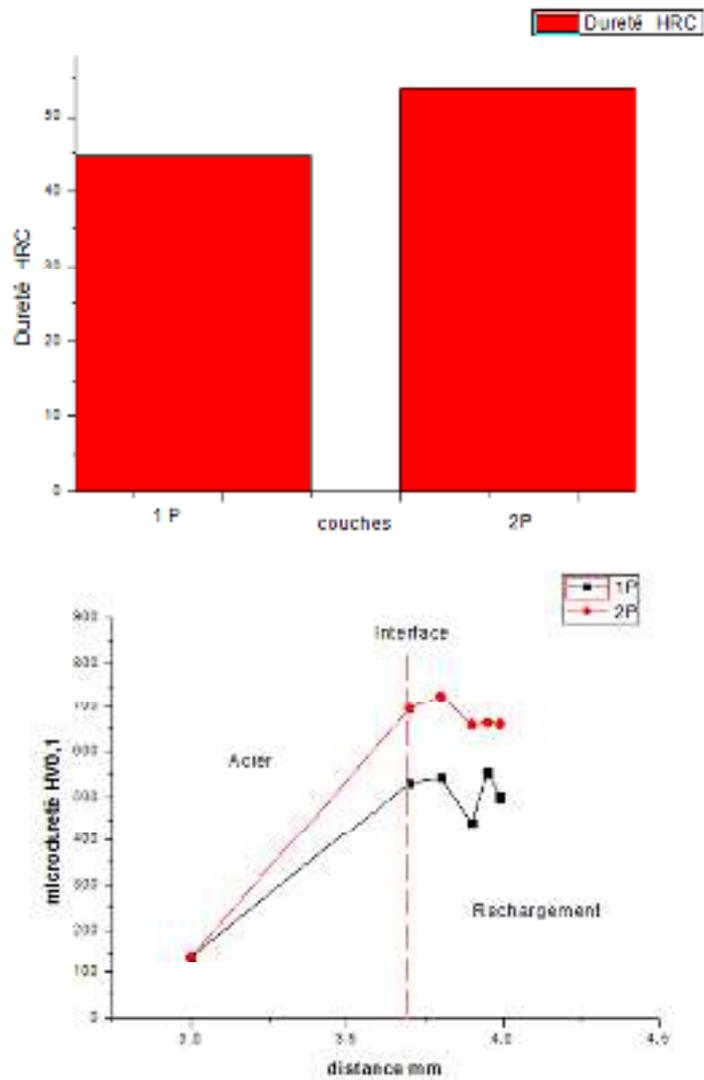


Figure 37: Dureté et microdureté des échantillons rechargés par Teromatec.

Dans ce cas aussi, le nombre de passes affecte la dureté du rechargement. La dureté du rechargement dépasse les 53 HRC alors qu'elle n'est que de moins de 45 HRC pour celui bâti avec une seule passe.

Dans ce procédé, lorsqu'on commence à déposer le rechargement, le taux de dilution joue un rôle important. Les paramètres opératoires tels que la vitesse de déplacement de la torche, son mouvement rectiligne ou en zigzag, la vitesse d'avance du fil, entre autres, jouent un rôle important dans l'importance de la formation du taux de dilution. C'est pourquoi, pour les grandes dépositions, l'automatisation est toujours employé afin d'assurer une reproductibilité maximale des propriétés du rechargement dur.

Dans notre cas, vu notre dextérité et l'emploi d'une torche semi-automatique, la reproductibilité de l'opération est très délicate. D'autre part, lorsqu'on dépose une seule couche, la fusion métallurgique des éléments du métal de base, constitué principalement de fer avec le métal d'apport, il en résulte une baisse de dureté. La deuxième passe se fait une première passe avec un matériau sensiblement le même puisque la dilution se fait surtout au niveau de l'interface substrat/première passe. Il en résulte alors une augmentation de la dureté.

Nous pouvons donc dire qu'en ce qui concerne le rechargement par le procédé Teromatec, la dureté augmente avec le nombre de passes en faisant atténuer l'effet de dilution.

#### 4.4 Essais d'érosion

Des essais d'érosion ont été réalisés sur des éprouvettes à soudure droite et d'autres éprouvettes à soudure en zigzag comme montré à la figure 38.



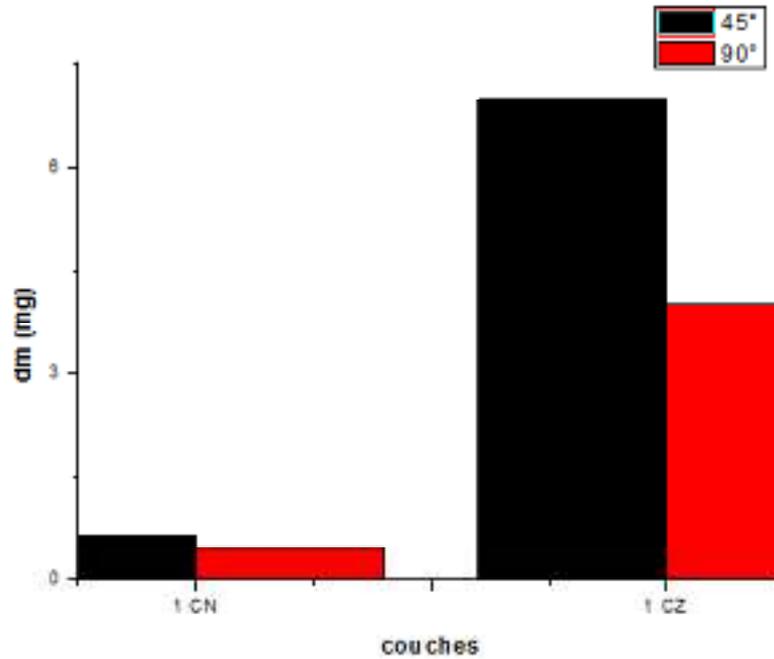
A: soudure droite



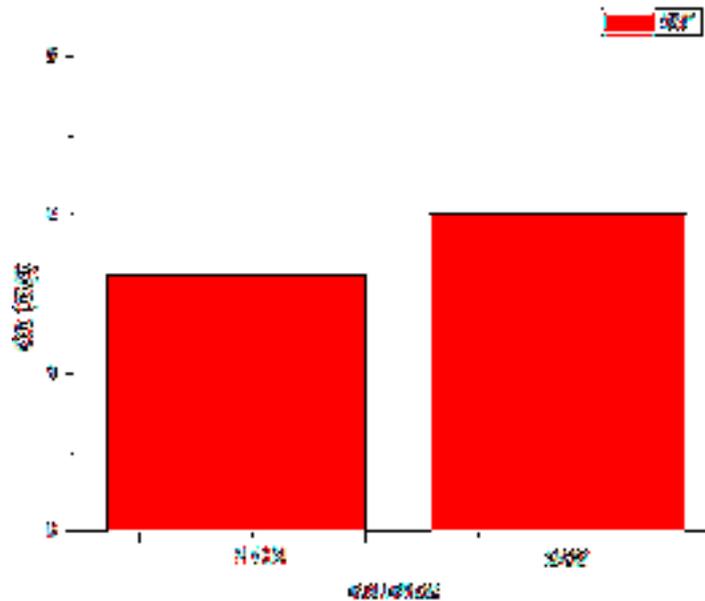
B : soudure en zigzag

Figure 38: Rechargement droit et en zigzag avec le Teromatec.

Les résultats des essais d'érosion sont montrés à la figure 39. lors des testes de dureté HRC et de microdurté HV0.1, on a constaté une augmentation de dureté non négligeable après un deuxième passe, la dureté de 1er passe a baissé peut être à cause de phénomène de dilution des élément de dépôt qui diminue les propriétés initial.



a) rechargement avec une seule passe



b) rechargement avec deux passes

Figure 39: Essais d'érosion (CN: passe droite, CZ: couche zigzag) .

Nous remarquons que le rechargement avec passe exécutée de façon rectiligne a un meilleur comportement en usure que celle exécutée en zigzag. Nous pouvons pas faire plus de commentaires sur ce comportement vu le peu d'essais que nous avons réalisé.

## CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude, nous avons projeté des dépôts de deux poudres à base de Nickel ( 8435PE ) et (Eutalloy 10009) séparément sur l'acier ordinaire par projection thermique à flamme-poudre ,d'un autre part on a fait des dépôt de différents formes avec le procédés MIG avec un file fourrée à base de Fer :( TeroMatec® 4327 ) sur le même types d'acier dans le but d'augmenter la résistance à la corrosion et à l'usure.des pièces utilisée dans les deux procédés.

L'objectif principal de ce travail est de voir l'impacte du changement des paramètres du rechargement dur tel que le nombres de couches de projection thermique et la forme de soudage par MIG sur les propriétés mécaniques.

Les résultats ont montré que:

Il est probable que les éléments carburigènes présents en plus grande proportion dans le revêtement 10009 réagissent mieux ou forment de carbures avec la déposition de passes successives et permettent donc d'avoir une micro-dureté plus importante que si le revêtement était déposé en une seule couche. Par contre, pour la première poudre 8435PE, ces éléments étant probablement beaucoup moins importants, la refusion ne fera que décomposer les carbures par l'apport supplémentaire de chaleur et par conséquent abaissera leur micro-dureté. Ce résultat est extrêmement important du point de vue pratique. En général, à la lumière de ces expériences, les poudres commerciales avec une forte proportion en éléments carburigènes auront de meilleures dureté si elles sont déposées en plusieurs couches. A l'inverse, celles dont la composition est appauvrie en éléments carburigènes, une seule couche est recommandée.

Cependant, le revêtement bâti avec trois couches et donc présentant la plus faible dureté, a un comportement meilleur que celui bâti avec deux couches seulement. Il y a deux causes, selon nous et avec les données dont on dispose, qui pourraient expliquer cette différence:

1. la refusion de la dernière passe ne s'est pas faite correctement pour le revêtement bâti avec deux couches. Par conséquent, il est probable que l'attaque des particules abrasives s'est surtout concentré sur la matrice et non sur le composite matrice/carbures.

2. L'éparpillement des carbures ne s'est pas faite de façon uniforme durant la déposition à cause de notre manque d'expérience, ce qui a produit un revêtement qui n'est pas uniforme partout du point propriété mécanique.

Ceci montre que dans le cas de l'emploi du procédé de déposition avec refusion, une dextérité de l'opérateur est exigée si l'on veut arriver à des résultats reproductibles et acceptables.

Nous pouvons donc dire qu'en ce qui concerne le rechargement par le procédé Teromatec, la dureté augmente avec le nombre de passes en faisant atténuer l'effet de dilution et que le rechargement avec passe exécutée de façon rectiligne a un meilleur comportement en usure que celle exécutée en zigzag.

l'opération étant manuelle, il est difficile d'assurer une bonne reproductibilité de la déposition lors de la projection.

## Références bibliographiques

### Bibliographie :

- [1] C.CHAUSSIN, G.HILLY, <<Métallurgie, alliages métalliques tome I>>, DUNOD, Paris 1976, pages 126, 127, 129,135 247, 248.
- [2]LECONTE.J.tuyauteries,<<A 830 protection contre la corrosion>>. Technique d'ingénieur.
- [3]: Alain PRONER Revêtements par projection thermique Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645 (Société AREGA), 2005
- [4] CHRISTIAN VARGEL Le comportement de l'aluminium et ses alliages Dunod technique, paris 1979
- [5]: Sylvain JACOB Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie. Technique de l'ingénieur (Société AREGA), 2005
- [6] Sylvain JACOB Données numériques sur les alliages d'aluminium de moulage. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M449 (Société AREGA), 2005.
- [7] : [www.wikipedia.org/projection thermique](http://www.wikipedia.org/projection_thermique)
- [8] : Lech powlowski Dépôts physiques, techniques, microstructures et propriétés Première édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 2003
- [9] : BARRALIS, MEADER Précis de métallurgies 5eme édition, afnor, Nathan 1990
- [10]: G. England Nature of thermal spray coatings. (Journée Scientifique, ONERA 2003)
- [11] R.LE GOUIC, <<Précis de soudage brassage et technique connexes>>, éditions Eyrolles,Paris 1978.
- [12] Collection ATS-OTUA, <<Propriétés d'emploi des aciers, conseils pour le soudage des aciers inoxydables>>, paris 1992.
- [13] R.VARISELLAZ, <<Soudage, éléments de conception et de réalisation>>, DUNOD, Paris 1982.
- [14] KLAS.WEMAN, <<Aide-mémoire, procédés de soudage>>, DUNOD, paris 2005.
- [15] H. GRANJON, <<Bases métallurgiques de soudage >>. 2ème édition. Publication du Soudage et de ses applications. Paris. 1995.

**[16]** R.CAZES, <<Soudage à l'arc>>, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, B7730, Août 1995.

**[17]** P-J CUNAT, <<Aciers inoxydables: Mise en oeuvre>>, Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux métalliques, M4542, Septembre 2000.

**[18]** L.MANDEL, <<Manuel pratique de soudage à l'arc>>, DUNOD, 6ème édition, Paris 1969.