

REPUBLIQUE ALGERIENNE BEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPERTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THEME :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ETAT
DE L'ACIER SUR SES CARACTERISTIQUE
TRIBOLOGIQUE

Réalisé par :

MOULESMARA Mohamed
LARBAS Abdelkader

Proposé par :

Mme TAHAR CHOUCHE Karima

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier « dieu » le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la santé, et pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail

Je tiens à remercier chaleureusement ma promotrice :

Mme TAHAR CHOUCHE Karima d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir prodigué des conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.

Des remerciements aux membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail.

A l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que tout le personnel administratif qui, a participé au bon déroulement de ce travail,

Mes remerciements vont aussi à mes amis et mes collègues de la promotion 2023.

A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié.

Sommaire

Résumé

Liste des figures Liste

Des Tableaux

Introduction Générale

Partie I Recherches bibliographiques

Chapitre I L'USURE

I. L'Usure.....	4
I.1. Usure des surfaces	4
I.2. Types d'usure.....	6
I.3. Classification des aciers	16
I.3.1 Aciers de construction	16
I.3.2 Aciers d'amélioration	16
I.3.3 Aciers de nitruration	17
I.3.4 Aciers à haute résistance	17
I.3.5 Aciers à haute tenue à l'usure	18
I.3.5.1 Aciers austénitiques au manganèse	18
I.3.5.2 Aciers martensitiques au chrome	
I.3.6 Aciers résistant à chaud	19
I.3.7 Aciers à outils	20

Chapitre II La projection thermique

II.1 Introduction	22
II.2 Historique.....	23
II.3 Principe de la technique	23
II.4 Les différents types de projection selon la source d'énergie	24
II.4.1 Projection à la flamme	24

II.4.1.1 Projection à la flamme supersonique (HVOF)	24
II.4.1.2 Projection à détonation	25
II.4.1.3 La projection à la flamme classique	26
II.4.1.3.1 Projection flamme-fil	26
II.4.1.3.2 Projection flamme-poudre	26
II.4.1.4 Projection à l'arc	28
II.4.1.4.1 Projection à l'arc électrique	28
II.4.1.4.2 Projection par plasma	29
II.5 Formation et structure des dépôts	30
II.6 Préparation de surface	31
II.6.1 La propreté	32
II.6.2 La rugosité	32
II.6.3 Le préchauffage	32
II.7 Caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique	33

Partie II Etude expérimentale du comportement à l'usure

Chapitre III Les moyens et les techniques expérimentales

III.1. Introduction	34
III.2 Les matériaux étudiés	34
III.3 Préparation des échantillons	35
III.3.1 Découpage	35
III.3.2 Traitements de durcissement.....	35
III.3.2.1 Durcissement par trempe et revenu	35
III.3.2.2 Durcissement surfacique par revêtement en céramique	38
III.4 Moyen d'étude de la résistance à l'usure	42
III.4.1 Description du tribomètre pion-disque	42
III.4.2 Conditions de déroulement des tests	43
III.4.3 Perte de masse	43
III.4.4 Calcul d'usure	44

Chapitre IV Résultats et discussion

IV.1 Analyse Microstructurale des différents substrats.....	45
IV.2 les résultats des essais d'usure.....	46

IV.3 Observation des faciès de dégradation des pistes.....	46
IV.4 Analyse du taux d'usure.....	50
IV.5 L'évolution du coefficient de frottement dynamique.....	50

Conclusion générale

Références bibliographique

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la dureté, et de la nature des matériaux sur le comportement en frottement et à usure par glissement sec.

Pour mener à bien notre étude, nous avons divisé le travail en deux parties, la première partie est constituée de (02) chapitres rassemble des informations bibliographiques sur l'usure et classification des aciers, la projection thermique et méthodes, moyenne et paramètre, la deuxième partie de la thèse, rassemble les techniques utilisées dans un seul chapitre et les résultats de notre étude avec leur interprétation dans le dernier chapitre.

Abstract

The objective of this work is to study the influence of the hardness and the nature of the materials on the behavior in friction and wear by dry sliding.

To carry out our study, we divided the work into two parts, the first part consists of (02) chapters gathers bibliographical information on the wear and classification of steels, the thermal projection and methods, average and parameter, the second part of the thesis, brings together the techniques used in a single chapter and the results of our study with their interpretation in the last chapter.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير صلابة وطبيعة المواد على السلوك في الاحتكاك والتآكل من خلال الانزلاق الجاف لـ مواد

لإجراء دراستنا قمنا بتقسيم العمل إلى قسمين ، الجزء الأول يتكون من (02) فصلا ا يجمع معلومات بيليوغرافية عن تآكل الفولاذ وتصنيفه ، الإسقاط الحراري وطرقه ،

المتوسط والمعامل ، الجزء الثاني من الأطروحة ، يجمع بين التقنيات المستخدمة في فصل واحد ونتائج دراستنا مع تفسيرها في الفصل الأخير

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Représentation schématique d'un contact glissant produisant une 4 particule (selon Archard)	Figure 1.2 : Vie d'un mécanisme
	5
Figure I.3 : Les quatre modes d'usure abrasive.....	7
Figure I.4 : Les micros rayures, les micros coupes et les micros fractures sur des surfaces d'acier usées par des abrasifs minéraux durs.....	8
Figure I.5 : Usure abrasive	9
Figure I.6 : Les rayures sur une surface selon les modes de l'usure	9
Figure I.7 : Modes d'usure dans un contact abrasif.....	10
Figure I.8 : Evolution de l'usure et de l'écart type de la rugosité	14

Chapitre II

Figure II.1 les principaux procédés utilisés dans la projection thermique.....	22
Figure II.2 Principe de la projection thermique.....	23
Figure II.3 Principe de projection HVOF.....	25
Figure II.4 Schéma de principe du canon à détonation	25
Figure II.5 Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil	26
Figure II.6 Principe de la projection flamme-poudre	27
Figure II.7 Schéma de projection à l'arc électrique	29
Figure II.8 Schéma de la projection plasma.....	30
Figure II.9 Le dépôt par la projection thermique à la flamme.....	31
Figure II.10 Représentation schématique des contaminants d'une surface métallique .	31

Chapitre III

Figure III.2 Polisseuse de marque PresiMinitech 233.....	36
Figure III.3 Testeur de dureté type BUEHLER	38
Figure III.4	
Figure III.5 Procédure de grenailage.....	39
Figure III.6 Plaque sur support avant la projection thermique.....	40

Figure III.7 La torche à flamme CastoDyn avec ses accessoires	40
Figure III.8 Représentation schématique de la réalisation d'un revêtement par projection plasma	41
Figure III.9 Tribomètre marque TRIBOtechnic (Pin-on-disc) utilisé.....	42
Figure III.10 Balance de précision de marque OHAUS.....	43

Chapitre IV

Figure IV.1 Microstructures des substrats traités et non traités.....	45
Figures IV.2 La variation du coefficient de frottement en fonction du temps	46
Figure IV.3 Trace d'usure du substrat et de la bille.....	47

Liste Des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Couple de matériaux compatibles	11
Tableau I.2 : Constat de dégâts sur les surfaces usées selon le type d'usure	15
Tableau I.3 : les caractéristiques mécaniques des aciers à haute résistance.....	17
Tableau I.4 : les caractéristiques mécaniques Aciers austénitiques au manganèse.....	18

Chapitre II

Tableau II.1 : résumé et compare les principales caractéristiques des techniques de projection thermique.....	33
--	-----------

Chapitre III

Tableau III.1 Composition chimique (pds %) des échantillons.....	34
Tableau III.2 Caractéristiques mécaniques physique des matériaux utilisé.....	34
Tableau III.3 les cycles thermiques de trempe et revenu.....	35
Tableau III.4 rugosités de surface des échantillons.....	37
Tableau III.5 rugosités de surface des échantillons.....	38
Tableau III.6 Paramètres et conditions de projections.....	42
Tableau III.6 Paramètres et conditions de projections.....	42

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les phénomènes de frottement et l'usure des matériaux sont des processus complexes et multidisciplinaires.

Il existe plusieurs applications dans le secteur industriel où le frottement et l'usure des surfaces antagonistes des éléments de la machine en contact dynamique jouent un rôle très important dans le comportement tribologique et la durée de vie du système mécanique. Le frottement et l'usure entraînent à la détérioration des surfaces opposées et peuvent être l'origine de l'invalidité de ce système. Les conséquences du frottement et l'usure sont liés à des facteurs physicochimiques et mécaniques, tels que le type de contact entre les surfaces des corps, la nature des matériaux en contact dynamique, la charge appliquée durant le fonctionnement du système mécanique étudié, la vitesse de glissement et la dureté des surfaces de matériaux antagonistes. Il est bien indiqué que plusieurs recherches ont étudié l'effet de la dureté sur les mécanismes d'usure par glissement non lubrifié des aciers.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la dureté, et de la nature des matériaux sur le comportement en frottement et à usure par glissement sec. Les essais ont été conduits, à sec, sur un tribomètre de type pion/disque, en utilisant un pion en acier 100Cr6 et des disques en aciers trempé-revenus et d'autres revêtus.

Pour ce faire, le mémoire comporte deux grandes parties en quatre chapitres.

La première partie est constituée de (02) chapitres rassemble des informations bibliographiques sur l'usure et classification des aciers, la projection thermique et méthodes, moyenne et paramètre.

La deuxième partie de la thèse, rassemble les techniques utilisées dans un seul chapitre et les résultats de notre étude avec leur interprétation dans le dernier chapitre.

A la fin du manuscrit, une conclusion générale est présentée avec une liste globale des différentes références bibliographiques utilisées.

Recherches bibliographiques
Chapitre I
L'USURE

I.1. Usure des surfaces :

Selon la plupart des spécialistes [J. M. GEORGES, Stefan KORECK (Ford), Masami NAKADA (Toyota)], les définitions établies à la littérature technique spécialisée, l'usure correspond à la « perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface ».

Du point de vue du mécanicien, la notion d'usure s'applique plus généralement à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou des systèmes, en général, on associe à l'usure la détérioration due à l'usage.

L'usure est un ensemble de phénomènes qu'on ne peut interpréter facilement, étant la cause de « naissance » de débris, l'usure engendre une perte de masse, de cote, de forme avec autres transformations physiques et chimiques de surfaces.

L'usure varie en fonction de la vitesse, de la température et du temps mais pas de manière progressive car certaines formes d'usure sont régulières et d'autres varient brusquement.

L'usure est à éviter autant que l'on peut pour ses effets négatifs mais parfois, on en a besoin comme dans le cas de l'affûtage des outils, de rodage des surfaces dites « neuves » d'un mécanisme [2].

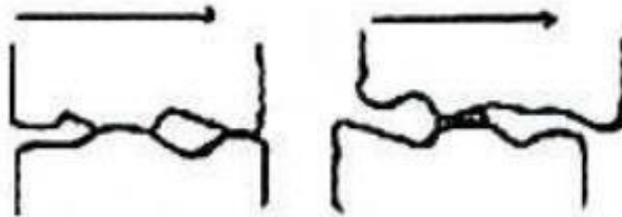


Figure I.1 : Représentation schématique d'un contact glissant produisant une particule (selon Archard)

Phases de la vie d'un mécanisme :

Un mécanisme passe normalement par trois phases ou (classes) d'usure successives, selon la quantité du matériau perdue par un élément actif d'un tribosystème, on distingue :

-L'usure douce ou ultra-douce : Le système s'use peu. Les surfaces restent lisses et les particules ont une dimension de l'ordre du micromètre.

-L'usure sévère : Les surfaces des corps sont modifiées, et la taille des particules dépassent 100 microns.

-L'usure catastrophique : La durée de vie est énormément réduite

Le test d'usure révèle trois différentes phases d'usure dans la vie d'un mécanisme comme le montre la figure (I.2),

OA : l'usure est rapide,

AB : utilisation normale de la machine

BC : la destruction des éléments de la machine

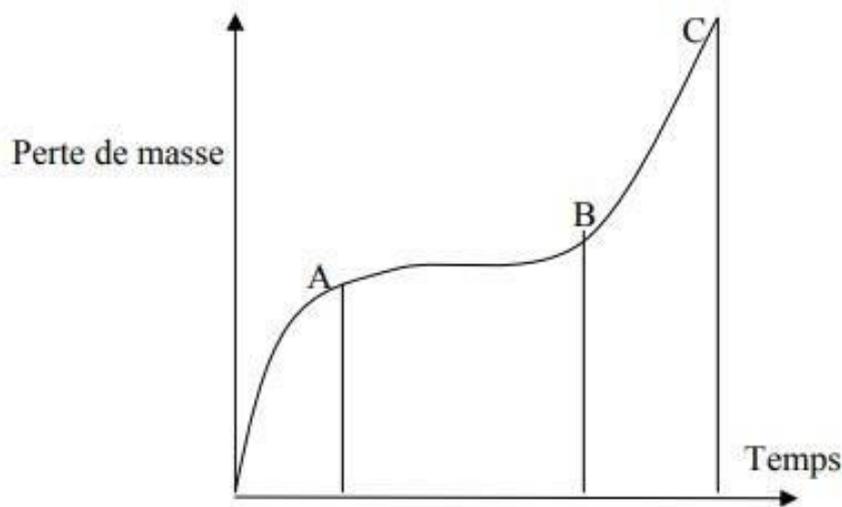


Figure 1.2 : Vie d'un mécanisme

La superfinition des surfaces lors du rodage : les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes.

Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce.

Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

La vie utile correspond au régime d'usure douce : La couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée petit à petit sous forme de petites écailles.

L'usure douce diminue la rugosité, alors que l'usure sévère l'accroît. -La vieillesse d'une surface se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage [3].

I.2. Types d'usure :

KRAGELSKY [3] distingue cinq (05) types d'usure :

a.) La « déformation élastique » du matériau par les saillies du corps antagoniste a lieu si les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement dans la zone de contact.

L'usure n'est alors possible que par fatigue, le passage répété du corps frottant produisant des micro-fissures de traction perpendiculaire à la surface.

b.) Le « repoussage plastique » se produit si les contraintes de contact atteignent la limite

d'écoulement et si le matériau contourne les saillies du corps antagoniste. L'usure résulte dans ce cas, après un petit nombre de cycles, de la fatigue provoquée par le contact frottant.

c.) La « micro coupe » survient si les contraintes dans la zone de contact atteignent la limite de rupture ou si le contournement des saillies par le matériau déformé s'interrompt. La détérioration a lieu juste au moment de l'interaction. La coupe est due aux aspérités, aux particules détachées et aux arrêtes des cavités déjà formées.

d.) La « rupture par cisaillement » de l'interface de friction ne provoque pas de détériorations immédiates mais s'ajoute aux contraintes et aux déformations agissant au contact, favorablement le processus de fatigue.

e.) La « rupture par arrachement » a lieu quand la résistance de l'interface dépasse celle du matériau sous-jacent, ce qui peut conduire au « grippage ». L'adhésion des aspérités est favorisée par les déformations plastiques et le raclage des couches oxydées.

Les nombreuses formes d'usure sont classées en plusieurs groupes :

- Abrasion, déformation ou coupe par corps durs,
- Adhésion, jonctions intermétalliques, micro grippages,
- Usure par corrosion, usure chimique...etc.

L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; Des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois être plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs.

-Difficultés de l'étude et de l'expertise :

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible. La compréhension d'un phénomène d'usure nécessite un enregistrement continu des divers paramètres permettant de caractériser l'état du système étudié au fil du temps. Mais l'inconvénient reste le nombre important des paramètres (caractéristiques géométriques des surfaces frottantes, l'état physico-chimique des matériaux sur une profondeur suffisante, l'état et la composition du film d'huile, les facteurs thermiques et mécaniques, etc.

Mais ce là n'est réalisable que pour des essais en laboratoire contrairement à un mécanisme réel en fonctionnement.

-Usure par abrasion :

Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage : Des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc.

L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure.

Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier.

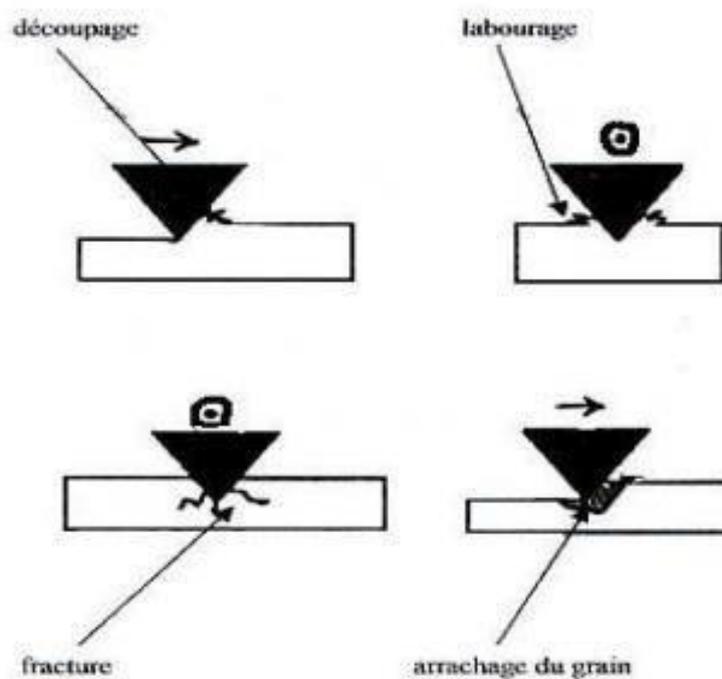


Figure I.3 : Les quatre modes d'usure abrasive.



Figure I.4 : Les micros rayures, les micros coupes et les micros fractures sur des surfaces d'acier usées par des abrasifs minéraux durs

Pendant l'usure abrasive, on a le déplacement de matière, produit par des particules dures, ou par des protubérances dures.

Un corps dur déforme plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière un corps plus mou, On peut distinguer :

-L'usure abrasive à deux corps : les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacements des aspérités abrasives.

-L'usure abrasive à trois corps : les particules abrasives dures sont libres dans l'interface et déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes.

L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface. On peut distinguer deux modes d'usure par abrasion.



Figure I.5 : Usure abrasive.

L'usure croît dès que la dureté de l'abrasif atteint 0,7 fois celle de la surface usée et se stabilise quand elle atteint 1,7 fois. L'abrasion par coupe, fonction de la forme des aspérités est négligeable si le rapport des duretés est compris entre 0,8 et 1,3.

Les débris émis par les surfaces possèdent une dureté bien supérieure à celle des matériaux en présence, provoquant une abrasion à trois corps.

Ceci est dû à l'écrouissage et à l'oxydation, cette dernière dépendant entre autres de l'humidité atmosphérique.

L'abrasion modifie profondément les couches superficielles qui deviennent comparables à celles obtenues par laminage.

Les surfaces durcissent et résistent mieux à l'abrasion elle-même.

L'usure dépend des vitesses relatives des surfaces et des particules, de la forme et de la résistance des grains. Elle croît avec la taille de ces derniers, se stabilisant pour une dimension critique voisine de 0,1 mm, et varie selon que les contraintes sont faibles ou fortes, les charges agissent directement ou indirectement, en brisant ou en déformant les grains abrasifs

Les caractéristiques de l'ambiance modulent l'abrasion mais influent en général assez peu si la vitesse d'usure est grande [3].

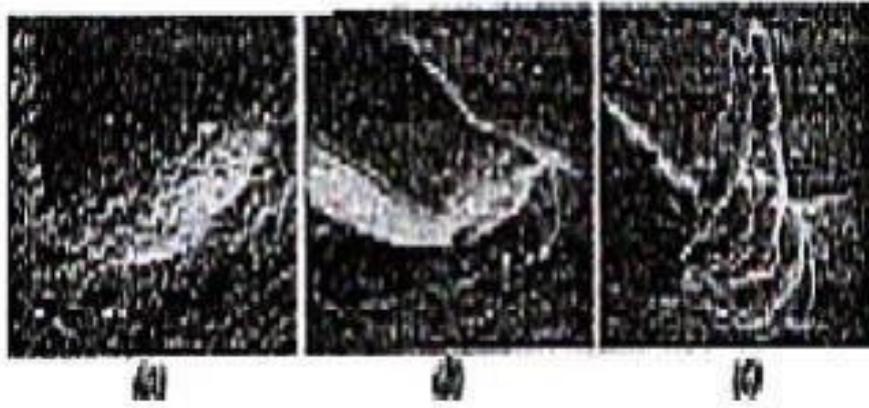


Figure I.6 : Les rayures sur une surface selon les modes de l'usure

(a) Déformation ou labourage ; (b) bourrelet plastique ; (c) copeau (observés par Challen, Oxley, Childs ou $\theta_a=5^\circ$, $\theta_b=25^\circ$, $\theta_c=60^\circ$) [3].

Il est essentiel que les particules et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des voies de ruissellement par moletage, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

L'usure des matériaux purs est à peu près inversement proportionnelle à leur dureté mais le rapport de proportionnalité varie avec leur structure.

Généralement on diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante. Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs, l'écaillage augmente la dureté et la résistance à l'usure.

Certains polymères résistent bien à l'abrasion, car ils absorbent beaucoup d'énergie avant de se fragmenter. Les revêtements durs sont souvent une solution.

Cependant, si l'abrasif n'est pas dur, le degré de pénétration D_p est déterminé expérimentalement en fonction du rapport « f » [$f = \tau / k$ ou f est une contrainte de cisaillement, τ contrainte mesurée dans l'interface et k est la contrainte d'écoulement du matériau égale à $H / 6$ avec H : dureté de contact].

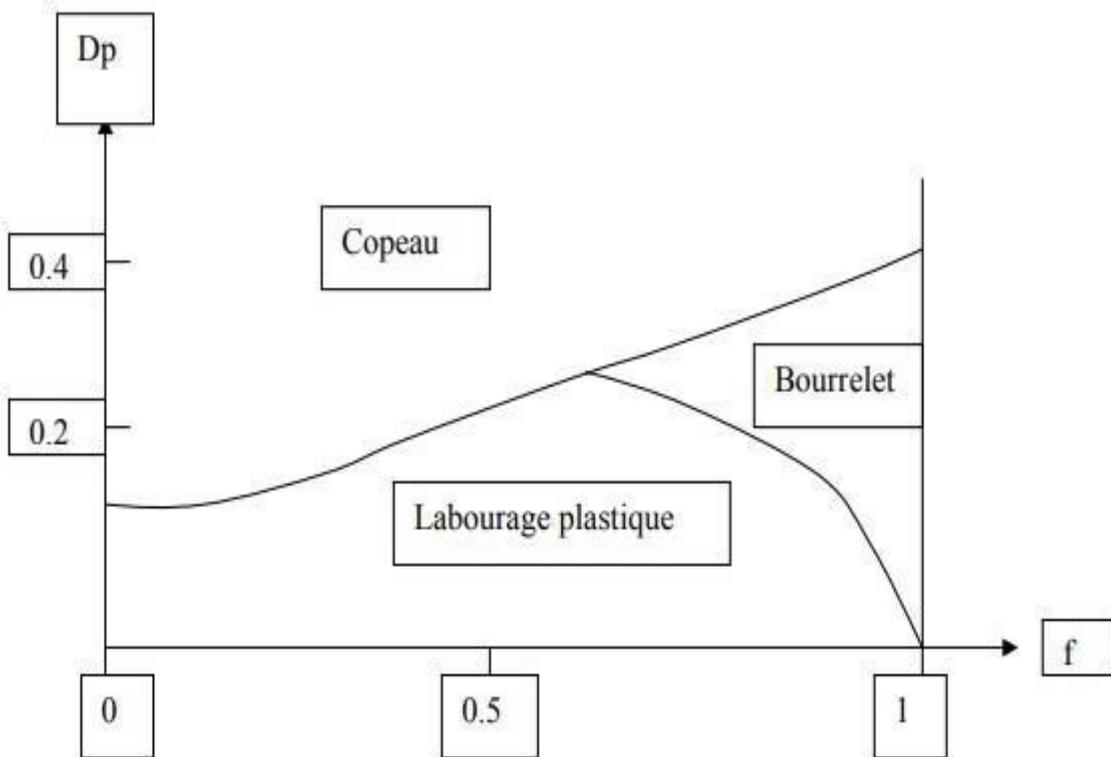


Figure I.7 : Modes d'usure dans un contact abrasif [3].

-Usure par adhésion :

Contrairement à ce qui se passe dans le cas de l'abrasion, de brusques changements de régime d'usure peuvent résulter de légères modifications des paramètres.

Pour des surfaces non-lubrifiées, le coefficient de frottement ne s'amplifie pas mais le taux d'usure peut varier d'un facteur très important. Il faut insister sur la solidité des soudures formées par usure adhésive.

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement par soudage en phase solide. Et si les métaux sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

L'effet de la charge est double : L'échauffement et la rupture des films d'oxydes favorisent l'usure adhésive, comme pour les engrenages lourdement chargés.

La vitesse a deux effets opposés, facilite la formation de films d'huile. C'est dans le vide que les risques de grippage sont les plus élevés.

Tableau I.1 : Couple de matériaux compatibles [3]

couples compatibles	
acier	argent, antimoine
chrome	argent, cadmium, or
molybdène	argent, cuivre, or, palladium
tungstène	argent, cuivre
argent	cobalt, rhénium

On peut métalliser les pièces par électrolyse afin de rendre compatible les paires de métaux comme exemple : L'étain en couches minces sur le solide en aluminium d'une part et l'acier de l'autre part (ex : axe en acier et coussinet en aluminium avec des couches minces en étain) ; Mais il faut tenir compte aussi du milieu environnant (milieu chimique, lubrifiant) et maîtriser ce genre de procédés pour éviter toute conséquence négative (comme la fragilisation par l'hydrogène) [3].

On peut aussi traiter les métaux ferreux par : Trempe, cémentation, nitruration ou carbonitruration avec un choix de matériaux dont les duretés sont différentes de l'ordre de 100HV pour éviter l'adhésion entre les surfaces de contact et ainsi le grippage sans oublier un bon polissage des surfaces en fin d'usinage des pièces [3].

-Usure par corrosion, usure chimique :

La corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle interagit avec le frottement. Les pièces sont « rongées » et portent de nombreuses piqûres ou crevasses.

L'usure est aggravée par les contraintes mécaniques et le frottement.

La corrosion peut par exemple éliminer le plomb d'un cuproplomb (alliage de plomb), le métal est devenu alors poreux en surface.

-Corrosion de contact :

La corrosion de contact est strictement liée aux zones de contact, cette forme d'usure est propre à des mécanismes où les assemblages sont soumis à de petits déplacements tangentiels rapides ou à des vibrations sous forte charge « usure induite par petits débattements ».

Les surfaces commencent par se colorer, puis elles se creusent de cavité remplies de débris émis. Les métaux ferreux produisent en abondance l'oxyde de fer de couleur rouge et brune (Fe_2O_3), sous forme de particules plates et allongées. Ce phénomène ne concerne pas seulement les métaux, mais il se produit aussi avec certaines matières plastiques.

La corrosion de contact s'attaque particulièrement aux pièces de haute qualité tels que les moteurs d'avion, clavetage et cannelures, manchons et emmanchements, roulements, mors de machine, portées de culasse sur bâtis de moteurs.

-Sur contraintes :

Le passage d'un curseur sur une surface engendre un ensemble de contraintes, parmi lesquelles :

- Des tensions, immédiatement à l'arrière du curseur, pouvant causer des accidents
- Des compressions sous la moitié du curseur, pouvant causer le fluage,
- Un cisaillement maximal à une certaine profondeur, engendrant le phénomène de fatigue.

Ses effets avec les défauts superficiels laissent apparaître des fissures sillonnant la surface dont la direction est perpendiculaire au mouvement.

-Fluage superficiel :

On remarque des écoulements de matière sans grand relief et très étalés. Le matériau flue sous l'effet de contraintes de compression suivant les trois axes de l'espace, même s'il est fragile comme le cas d'un acier cimenté.

-Fatigue :

L'usure par fatigue est lente et habituellement cachée par l'abrasion ou l'adhésion. Causée par le frottement de roulement ou de glissement sous fortes charges répétées, ce cas est rencontré essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles car la pièce peut garder une apparence intacte mais si elle est atteinte.

Il existe deux sortes d'avaries différentes :

a- La fatigue superficielle par écrouissage :

Elle est due aux contraintes maximales de traction ou de compression car le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat brillant du métal et la disparition des marques d'usinage.

L'accident typique est le piquage des engrenages prenant la forme d'un « V » se rangeant suivant la direction du mouvement et peut être néfaste si le métal a tendance de le propager.

b- La fatigue profonde ou écaillage :

Après un long temps de vieillissement, il se produit une émission brutale de particules dont la surface atteint quelques mm², la profondeur quelques dixièmes de mm et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal.

L'usure s'étend par le bord des zones écaillées attaquant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli.

-Lubrifiants et fatigue de surface :

La présence d'huile a un effet bénéfique sur la propagation des fissures en réduisant la variation des contraintes, mais elle peut aussi multiplier par « 10 » cette propagation à cause d'autres effets : Ouverture des fissures par pression hydraulique, pollution par des produits provoquant une corrosion, eau dissoute entraînant une fragilisation par l'hydrogène.

-Erosion :

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux. Lors des chocs, il y a ébranlement du matériau de la surface, les dégâts sont fonction de l'énergie cinétique, donc de la masse et du carré de la vitesse de la particule.

L'enlèvement de matériau croît très vite avec la vitesse. Le comportement est très différent selon la nature du matériau.

L'érosion diffère de l'abrasion car elle est liée à l'énergie cinétique des particules qui « bombardent » les surfaces à grande vitesse, créent des petits cratères par déformation plastique du matériau.

La perte de matière résulte de la coupe ou des déformations des aspérités formées par les impacts successifs.

Cavitation :

La cavitation exige un mouvement relatif entre un solide et un fluide. Elle concerne d'abord les organes pour fluides, pompes, hélices de bateaux, mais aussi certains mécanismes lubrifiés tels que les coussinets de moteurs ou engrenages.

Des trous, à peu près hémisphériques, apparaissent hors de la zone frottante ou à sa limite puis l'ensemble de la surface est usé.

La destruction, souvent catastrophique, est très rapide et très bruyante.

-Fatigue thermique :

C'est une dégradation par alternance d'échauffements et de refroidissements, qui touchent pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge, mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions.

La fissuration finale a un aspect caractéristique de mosaïque, dit de « faïençage ». Les fissures sont plus ou moins polygonales et suivent les joints de grains et s'enfoncent dans les matériaux perpendiculairement à la surface.

-Usure par dissolution :

Si on prend l'exemple des outils d'usinage, On constate une usure catastrophique d'outils de coupe utilisés dans des conditions sévères. Le carbure de tungstène, vers 1100°C, migre dans les copeaux de métaux ferreux et l'outil est littéralement « usé » par le fer chaud.

La figure suivante illustre l'évolution de l'usure entre la rugosité de la surface de contact et la distance cumulée de glissement tout au long de la durée de vie de la pièce (surface de contact).

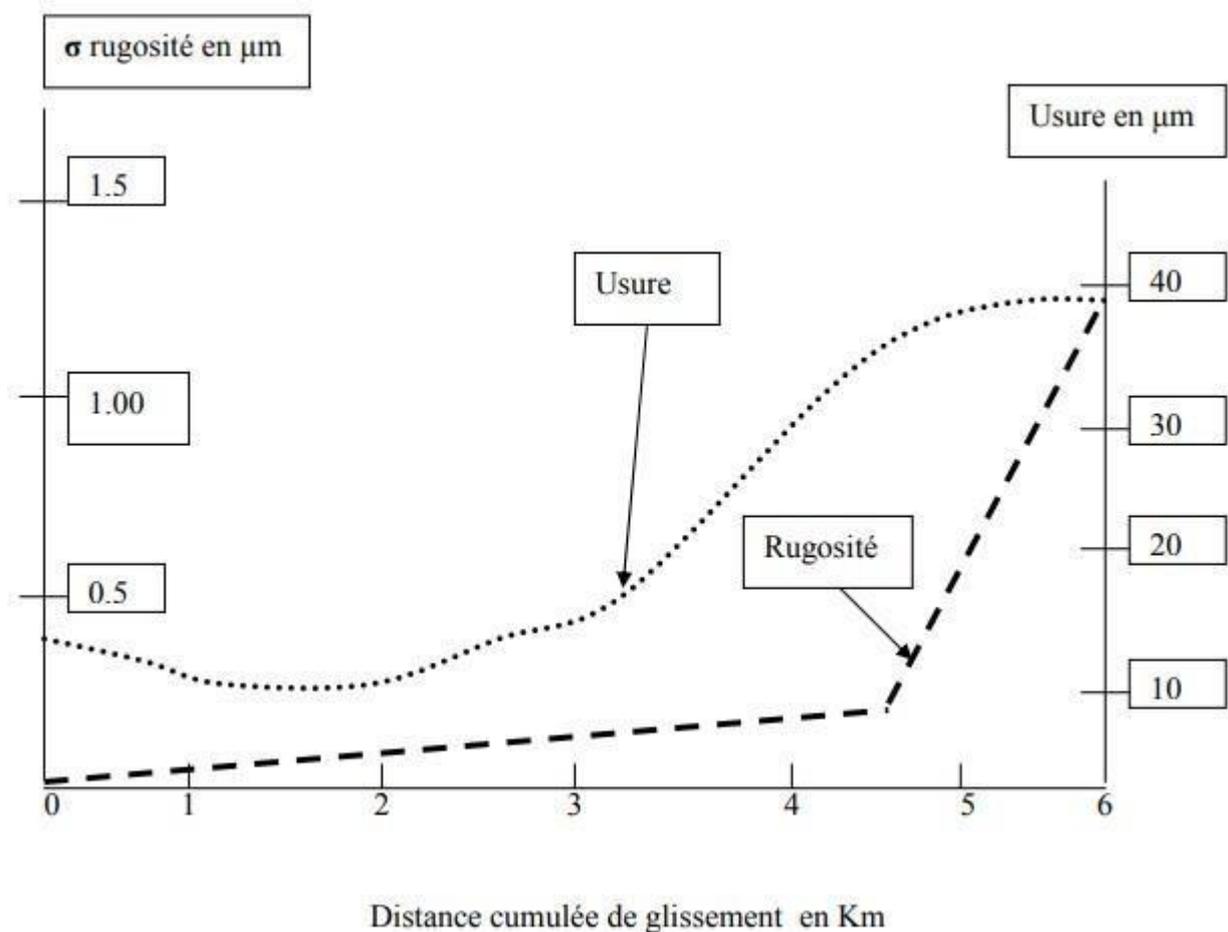


Figure I.8 : Evolution de l'usure et de l'écart type de la rugosité.

On révèle dans le tableau suivant la relation entre le type d'usure et les surfaces usées,

Tableau I.2 : Constat de dégâts sur les surfaces usées selon le type d'usure.

TYPE D'USURE	SURFACE USEE	PARTICULES D'USURE
Adhésive	- transferts - déformations plastiques	- taille relativement importante (10µm et plus)
Abrasives à deux corps	- surface d'aspect texturé - rayures parallèles	- micro copeaux
Abrasives à trois corps	- surface d'aspect aléatoire - indentations - déformations plastiques	- écailles - métal fortement déformé plastiquement
Corrosive	- films de surface colorés - aspect non uniforme	- lames minces de produit de réaction chimique
Délamination - fatigue (matériaux ductiles)	- fractures parallèles à la surface - piquûres, écaillages - déformations plastiques	- particules en feuille - épaisseur faible
Fracturation (matériaux fragiles)	- fractures en fer à cheval, perpendiculaires à la surface de frottement - faciès de fracturations	- grosses particules - particules d'aspect fracturé, anguleuses
Fretting	- trace d'usure en forme d'anneau, ou localisée - fractures débutant en surface de profondeur variable	- agglomérats en périphérie de la zone de contact
Erosion	- aspect aléatoire - traces d'impacts, rayures fortes déformations plastiques	- micro copeaux
Cavitation	- "cavités" - défauts dans des zones de dépression	- micro écailles

I.3 CLASSIFICATION DES ACIERS

Les aciers et les fontes sont les matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de l'industrie. Un acier est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est $\leq 2\%$, Selon leur usage, les aciers et les fontes, sont classées en plusieurs groupes [5].

I.3.1 Aciers de construction

Dans les groupes des aciers de construction, on trouve les aciers au carbone et les aciers alliés, destinés à la fabrication des éléments de machines, utilisés dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. La teneur en carbone dans ce groupe d'aciers ne dépasse pas 0,5 à 0,6 %.

Un acier de construction doit posséder en plus des bonnes propriétés mécaniques, de bonnes propriétés technologiques telles que se prêter bien au formage (laminage; forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage, avoir une pénétration de trempe élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempe.

Il existe des centaines de nuances d'aciers de construction. Les aciers de construction sont élaborés dans des fours martin (acides et basiques), dans des fours électriques ouverts et dans des convertisseurs à soufflage supérieur [5].

I.3.2 Aciers d'amélioration

Ce sont les aciers utilisés après trempe et revenu à haute température et contenant entre 0,3 et 0,5 % C. Les aciers d'amélioration doivent avoir une limite élastique élevée, une faible susceptibilité à l'entaille, une bonne pénétration de trempe et une faible aptitude à la fragilité de revenu.

Les nuances contenant entre 0,35 et 0,45 % s'emploient surtout pour les pièces de sections relativement petites, ou sollicitées par des charges relativement faibles. Pour des pièces volumineuses, on emploie les aciers alliés pour augmenter la pénétration de trempe. Pour des pièces encore plus grandes, on utilise les aciers fortement alliés exposés ci-après [5].

I.3.3 Aciers de nitruration

Appliquée à un acier non allié, la nitruration ne donne qu'un durcissement faible et la pénétration de l'azote en profondeur fragilise les pièces.

Par contre, il suffit d'introduire une faible quantité d'aluminium (1 à 2) % ou éventuellement d'autres éléments d'alliage, tels que le chrome, pour que la consolidation en surface s'intensifie sans affecter le cœur. L'addition d'une certaine quantité de molybdène, assure le maintien prolongé à 550°C et ne change pas la résilience (pas de fragilisation).

La dureté obtenue dans la couche nitrurée est d'autant plus élevée que le teneur en aluminium est plus forte. Pour obtenir une résistance au cœur, plus importante, on augmente la teneur en carbone (jusqu'à 0,5 %), en gardant inchangée celle de l'aluminium [5].

I.3.4 Aciers à haute résistance

Les exigences de ces aciers sont les suivantes :

- Une résistance mécanique élevée.
- Une bonne tenue à la rupture fragile.
- Une fiabilité élevée en service.

Ces prescriptions correspondent, dans une grande mesure, aux aciers martensitiques de vieillissement qui contiennent très peu de carbone (< 0,03 %) et appelés aciers « Maraging ». Ce sont les ferronickels martensitiques traités par durcissement structural. Ils sont souvent additionnés de cobalt, de molybdène, de niobium, etc., pour assurer le vieillissement.

Lors du vieillissement, le chrome consolide la martensite, améliore la tenue à la corrosion. Le manganèse provoque le vieillissement de la martensite Fe-Ni, mais diminue la plasticité et la ductilité de la martensite vieillie.

Le plus utilisé des aciers Maraging est le Z3 NKDT 18-9-5 contenant 18 % Ni, 9 % Co, 5 % Mo, et 0,7 % Ti. Son traitement thermique comporte un recuit d'une heure à 820°C avec un refroidissement à l'air, suivi d'un traitement de vieillissement de 3 heures à environ 480°C. Les caractéristiques mécaniques après recuit et vieillissement sont portées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.3 : les caractéristiques mécaniques des aciers à haute résistance.

Etat	R _m (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	KCV (J/cm ²)
Recuit	650 à 1020	630 à 700	15 à 20	70 à 80	31 à 45
Vieilli	1750 à 1950	1650 à 1850	10 à 12	48 à 57	31 à 45

Cet acier se distingue donc par ses bonnes propriétés de résistance et de ductilité. A l'état trempé, il se prête bien à l'usinage, au corroyage et au soudage.

Les aciers martensitiques de vieillissement s'emploient dans les industries aéronautiques, navales, dans les constructions d'appareils de mesure et de contrôle, etc.

I.3.5 Aciers à haute tenue à l'usure

Il existe deux classes d'aciers résistant à l'usure :

- Les aciers austénitiques au manganèse.
- Les aciers martensitiques au chrome.

I.3.5.1 Aciers austénitiques au manganèse

Ce sont des aciers austénitiques à haute teneur en manganèse, de composition moyenne de (0,9 à 1,3) % C et de (11,5 à 14,5) % Mn.

Ces aciers n'ont pas une dureté particulièrement élevée, mais ils possèdent une aptitude remarquable à s'écrouir sous l'effet de faibles déformations plastiques. Ils ont de ce fait, une très bonne tenue au frottement, convenablement traités, ils sont très peu fragiles.

Leur haute aptitude à s'écrouir, les empêche d'être usinables et ils ne peuvent être mis en forme que par moulage et rectification. Après coulée, ils sont constitués d'austénite et de carbure en excès

(Fe, Mn) C, qui se précipite aux joints de grains en altérant la résistance et la ductilité.

3

Les aciers austénitiques au manganèse conviennent pour des pièces de frottement (rails de chemins de fer, godets d'excavateur, mâchoires de concasseur, etc.). L'acier le plus connu de cette catégorie est l'acier "Hadfteld" de désignation normalisée Z 120 M 12, dont les caractéristiques mécaniques sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.4 : les caractéristiques mécaniques Aciers austénitiques au manganèse

Etat:	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	Dureté (HB)
Trempe à l'eau	850 à 1050	340 à 440	40 à 60	35 à 40	160
Écroui (10 à 20)%	1200 à 1250	800 à 900	15 à 25	-	200

I.3.5.2 Aciers martensitiques au chrome

Les aciers martensitiques au chrome sont des aciers résistants à l'usure, usinables et qui peuvent imposer une certaine conservation de dimensions.

Il existe deux catégories :

- Les aciers ayant (0,4 à 0,48) % C et (0,7 à 1,1) % Cr.
- Les aciers ayant (0,95 à 1,1) % C et (1,3 à 1,6) % Cr.

Les aciers de la première catégorie correspondent à la nuance 42 CD 4.

Pour les applications demandant une bonne résistance à l'usure, cette catégorie exige une élaboration particulièrement soignée.

Les aciers, de la deuxième catégorie, correspondent à la nuance 100 C 6, qui est une nuance d'acier pour roulements, ils ont une très haute dureté à l'état traité.

Dans le cas des pièces volumineuses, pour lesquelles la trempabilité du 100 C 6 est insuffisante, on rajoute (0,2 à 0,4) % de molybdène sans faire varier la composition chimique du carbone et du chrome.

I.3.6 Aciers résistant à chaud

Le besoin d'aciers pour emploi à haute température se fait sentir dans les domaines industriels suivants :

- Construction des fours; (soles, chemins de roulement, grilles).
- Construction des générateurs de vapeur.
- Boulonnerie. • Construction des turbines à gaz ou à vapeur.

L'augmentation de température influe fortement sur les propriétés mécaniques, en particulier, elle provoque la diminution des caractéristiques de résistance (E, Rm, Re et HB) et l'élévation des caractéristiques de plasticité en particulier, et le fluage.

Par conséquent, les exigences d'emploi sont les suivantes :

- Grande résistance à la déformation à chaud (fluage, relaxation, fatigue à chaud).
- Bonne résistance aux chocs thermiques.
- Grande résistance aux agents chimiques à chaud (oxydation, corrosion).

- Facilité de mise en œuvre (aptitude à la conformation à chaud ou à froid, soudabilité, usinabilité).

La résistance à chaud peut être améliorée par addition d'éléments d'alliages à la solution solide. Ceux-ci renforcent l'énergie de liaison interatomique et retardent le processus de diffusion, tout en élevant la température de recristallisation.

Les aciers, pour emploi à haute température, atteignant les 950°C (pointes d'outils de coupe en service), sont élaborés à base de nickel, de fer et de cobalt, alors que ceux atteignant des températures encore plus élevées (1200 à 1500) °C, sont réalisés à base de chrome, de molybdène et d'autres éléments difficilement fusibles.

Parmi les aciers résistants à chaud, on peut citer les aciers perlitiques, martensitiques et austénitiques.

I.3.7 Aciers à outils

Les aciers à outils sont des aciers au carbone et alliés à plus de 0,5 % C. Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure. • Une forte résistance mécanique.

Dans le cas général; ce sont des aciers hypereutectoïdes et lédéburitiques, dont la structure après trempe et revenu à basse température se compose de martensite et de carbures.

Pour les outils qui demandent une ductilité relativement élevée (matrices de formage à chaud), on emploie des aciers hypoeutectoïdes.

Après trempe et revenu à haute température, ils acquièrent une structure de sorbite.

Chapitre II

Projection thermique

II.1 Introduction

La projection thermique est considérée comme l'une des technologies clés de l'ingénierie de surface. Étant donné que la technique de la projection thermique a été inventée au début du XXe siècle, l'utilisation de revêtements thermiques pulvérisés a augmenté énormément et ils sont largement utilisés dans l'ensemble des industries mécaniques modernes.

Cette technique utilise une très large gamme des matières premières solides (y compris les métaux et alliages, métaux durs, céramiques et polymères) principalement sous la forme des poudres, des fils et des barguettes, pour la formation du revêtement, la déformation plastique des particules pulvérisés au moment de l'impact est une condition préalable après accélération à l'intérieur ou à l'extérieur de pistolet de pulvérisation. Dans la plupart des techniques de la projection thermique ceci est réalisé en complète ou partielle fusion du matériau de particules projetées.

La figure II.1 présente les principaux procédés utilisés dans la projection thermique. Ils sont regroupés par la source d'énergie :

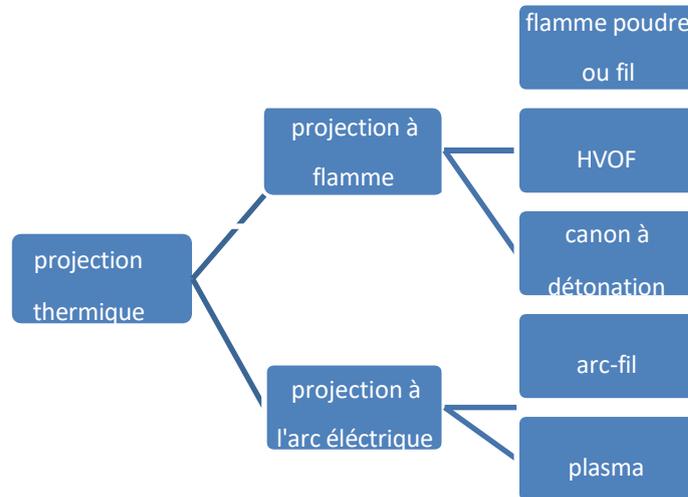


Figure II.1 les principaux procédés utilisés dans la projection thermique.

II.2 Historique

Au début du 20ème siècle (1909) un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich Schoop a minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, ce qui lui a inspiré de réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu. Dans un premier temps, il a utilisé un creuset rempli de métal fondu et de l'air préalablement chauffé pour la pulvérisation et la projection du métal. Après différentes évolutions techniques, l'utilisation d'un chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifiée et brevetée en 1911 comme "processus pour fondre un matériau dans une zone de chauffage et pour le propulser à l'état fondu et/ou ramolli par la chaleur, sur une cible pour y former un enduit.

II.3 Principe de la technique

La projection thermique est une technique de traitements de surface qui réalise des dépôts épais de matériaux aussi différents que les métaux purs, les alliages métalliques, les oxydes métalliques, les carbures, nitrures, borures, siliciures ainsi que des matières plastiques. Tous ces matériaux peuvent être projetés et déposés sur des substrats métalliques, céramiques, plastiques et également pour certains d'entre eux sur du bois, du verre et même du papier. Les matériels utilisés en projection thermique font appel aux énergies de la flamme oxy-gaz et ou l'arc électrique pour fondre les matériaux d'apport et les propulser à des vitesses quelquefois supersoniques sur les pièces à revêtir.

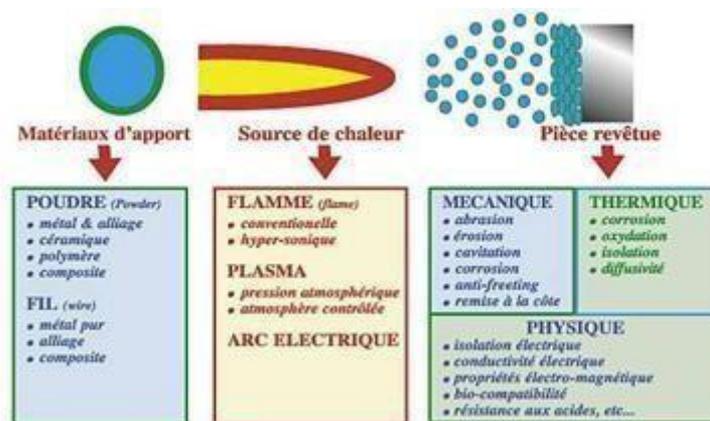


Figure II.2 Principe de la projection thermique.

II.4 Les différents types de projection selon la source d'énergie

II.4.1 Projection à la flamme

L'utilisation de l'énergie d'une réaction chimique de combustion est un principe de base pour trois grandes techniques de projection à la flamme. En fonction de la propagation de la réaction chimique, différentes techniques sont utilisables.

1. La projection à la flamme classique à une vitesse d'éjection des gaz de l'ordre de 100 à 150 m/s.
2. La technique appelée HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) qui est basée sur la combustion continue de gaz introduits sous pression à fort débit, ce qui conduit à en une vitesse d'éjection variant entre 1500 et 2500 m/s.
3. Enfin la projection par détonation : c'est un processus discontinu permettant d'utiliser l'énergie d'une détonation.

II.4.1.1 Projection à la flamme supersonique (HVOF)

Dans le procédé de projection hypersonique (HVOF High Velocity Oxy-Fuel), la combustion de fuel (Kérosène, l'acétylène, le propylène et l'hydrogène) avec l'oxygène se fait dans la chambre du pistolet. Et produit une flamme à haute pression qui est forcée vers la buse en augmentant sa vitesse. La poudre peut être introduite axialement dans la chambre sous haute pression ou alimentée par le côté d'une buse de type Laval où la pression est plus faible.

En raison de la haute pression à l'intérieur de la chambre de combustion, la détente des gaz peut propulser des particules injectées dans la flamme à des vitesses supérieures à 2000 m / s. Cependant, la flamme atteint des températures beaucoup plus basses, 2600°C en utilisant du kérosène comme combustible. La figure I.3 résume le revêtement la projection thermique HVOF. La très haute énergie cinétique des particules frappant la surface du substrat ne nécessite pas que les particules soient complètement fondues pour former des revêtements de haute qualité. Il s'agit d'un avantage pour les revêtements de type carbure ou cermet.

La projection HVOF est considérée comme avantageuse par rapport aux autres processus de projection thermique, essentiellement pour des matériaux ayant des points de fusion inférieurs à 3000 K.

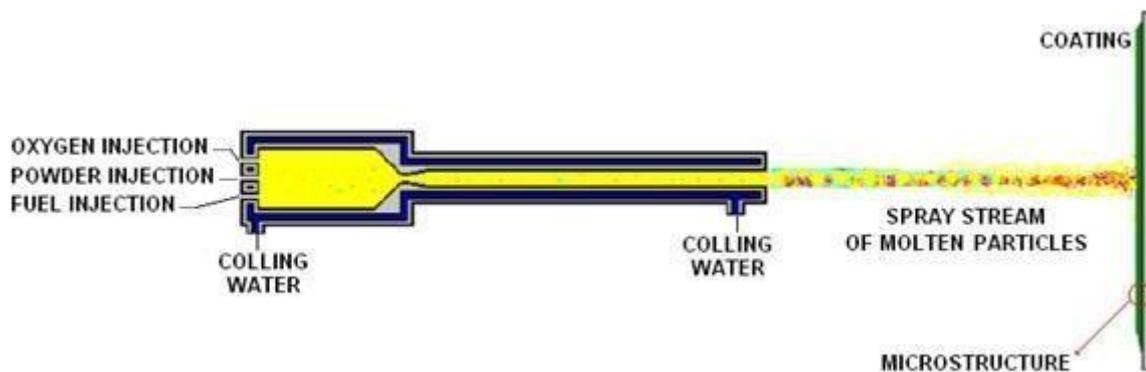


Figure II.3 Principe de projection HVOF.

La très haute énergie cinétique des particules frappant la surface du substrat ne nécessite pas des particules complètement fondues pour former des revêtements de haute qualité HVOF. Il s'agit d'un avantage pour les revêtements de type carbure de cermet.

La pulvérisation HVOF est considéré comme avantageuse par rapport aux autres processus de projection thermique, essentiellement pour des matériaux ayant des points de fusion inférieurs à 3000 K.

II.4.1.2 Projection à détonation

Le procédé est connu sous le nom de D-Gun (détonation gun). Le dispositif principal est un canon à détonation, où la réaction d'oxydation se produit avec une vitesse supérieure à la vitesse du son. Le canon est constitué d'un tube de diamètre 21 à 25 mm et d'une longueur d'environ 1 m fermé d'un côté. Il est équipé d'un système de soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé.

La poudre est injectée en même temps que le mélange des gaz (généralement acétylène/oxygène).

L'onde de choc de l'explosion amorcée par une étincelle propulse la poudre tout au long du canon avec une vitesse proche de 1000 m/s.

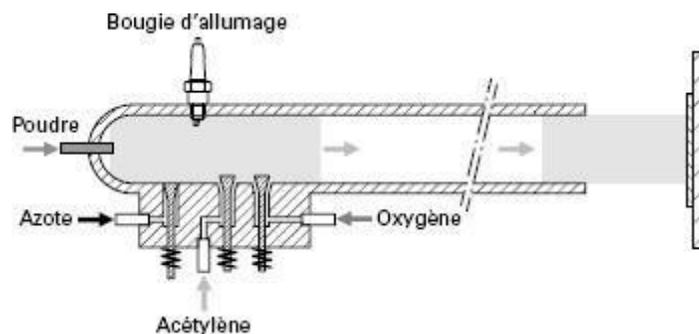


Figure II.4 Schéma de principe du canon à détonation.

Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 à 10 tirs par seconde et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède un faible taux de porosité (moins de 1%) et une très bonne adhérence (80 MPa) mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300 μm .

II.4.1.3 La projection à la flamme classique

II.4.1.3.1 Projection flamme-fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de barguette, en son centre.

Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé.

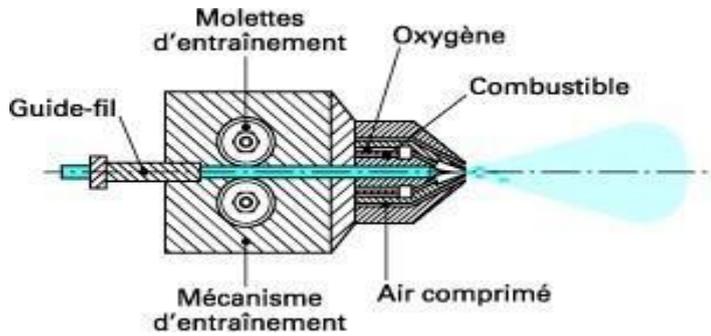


Figure II.5 Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil.

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés, et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de la refusion après projection permettant d'améliorer l'adhérence et de diminuer la porosité. La projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques ou de polymères est également possible.

II.4.1.3.2 Projection flamme-poudre

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (figure II.6).

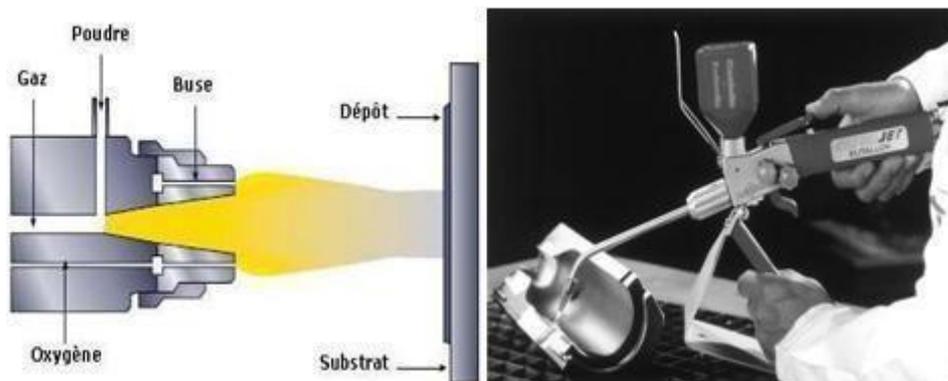


Figure II.6 Principe de la projection flamme-poudre.

La poudre à projeter peut-être un métal pur, un alliage, un composite, un cermet ou certaines céramiques à bas point de fusion. La température de fusion des matériaux utilisés doit être inférieure à 0,6 à 0,7 la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,6 \text{ à } 0,7 T_{\text{flamme}}$).

En raison de la faible vitesse d'impact des particules projetées, de l'ordre de 30 à 50 m/s, les dépôts obtenus ont une faible adhérence (de l'ordre de 20 à 40 MPa) et une porosité relativement élevée (10 à 20%). Les matériaux les plus utilisés sont les alliages auto fusibles (alliages à base de Ni ou Co contenant du bore et/ou du silicium et les alliages à bas point de fusion. Pour les alliages auto-fusibles, la refusions et la liaison du dépôt avec le substrat, sont obtenues par un posttraitement de chauffage après projection. Les dépôts refondus sont denses et presque sans porosité.

De plus, les oxydes sont éliminés grâce au bore et au silicium sur lesquels l'oxygène se fixe préférentiellement et qui diffusent ensuite vers la surface du fait du gradient de température.

Ces torches sont des chalumeaux oxygaz équipés d'un récipient contenant la poudre. Celle-ci tombe par gravité et est entraînée par un des gaz de combustion, pour être introduite dans la flamme. La vitesse de projection est très faible. La distance de la buse au support est très courte (quelques millimètres). La flamme sert à chauffer le substrat et à assurer la fusion de la poudre. Une liaison de type brasure est ainsi réalisée.

Ces chalumeaux sont peu onéreux et sont très appréciés pour leur facilité d'emploi. Ils restent un outil privilégié des services maintenance et des petites entreprises pour résoudre des problèmes de rattrapage de côtes, d'abrasion ou de corrosion par exemple. Les matériaux d'apport sont des alliages dits « auto fusibles » (voir § 5) à base Ni ou Co (alliés à des éléments tels que Cr, B, Si) et chargés éventuellement en carbures.

Ces pistolets se différencient des précédents par leur puissance calorifique et par le fait que le substrat n'est pas chauffé par la flamme. Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

— À réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion.

— À réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

Ces matériels sont utilisés soit manuellement (ils sont alors couplés avec un tableau de réglage des pressions et débits de gaz), soit sur machines automatiques, la gestion des cycles et des paramètres étant assurée par des consoles programmables.

La vitesse des particules projetées est faible (30 m/s) et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue).

Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat. Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto fusibles.

Ce matériel est plus répandu que le précédent, et reste d'un coût très abordable, il est apprécié pour son niveau sonore faible et est utilisé dans tout type d'industrie pour des applications telles qu'isolation thermique ou électrique, usure, corrosion, sur pièces neuves ou usagées.

II.4.1.4 Projection à l'arc

II.4.1.4.1 Projection à l'arc électrique

La projection à l'arc électrique est un processus très utile pour faire des revêtements métalliques grâce à son à faible coût. Le fil utilisé pour le soudage peut être pulvérisé à arc électrique à haut débit (30 à 50 kg / h), Deux fils sont utilisés dans ces procédés, qui sont chargés électriquement, l'une positive et l'autre négative par passage de courant. Les fils sont réunis pour faire un arc, l'air comprimé provenant de la buse réduit le métal fondu à petites particules et les pulvérise sur le substrat. Un taux de pulvérisation plus élevée peut-être obtenu en utilisant un courant élevé. Le revêtement formé par ce procédé a une densité relativement élevée et adhère bien sur le substrat. Une plus grande densité et de plus la force de liaison peut être obtenue par mise en œuvre du procédé dans une chambre à pression réduite.

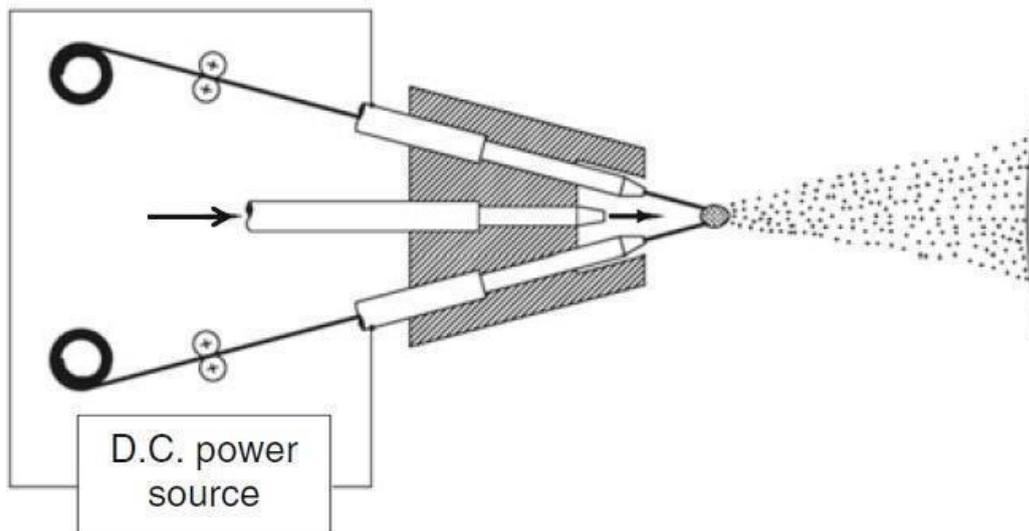


Figure II.7 Schéma de projection à l'arc électrique.

II.4.1.4.2 Projection par plasma

C'est la méthode la plus commune de revêtement par projection thermique, et est appliquée comme projection plasma air - Air Plasma Spraying (APS) - ou comme projection sous atmosphère contrôlée.

Un arc électrique se forme entre une cathode et la buse concentrique du pistolet pulvérisateur. Un mélange de gaz et de flux élevé le long de l'électrode est ionisé par l'arc, et forme le plasma. Ce jet de plasma est projeté hors de la buse, où la poudre du matériau de revêtement est injectée dans le jet de plasma. La chaleur et la vélocité du jet de plasma fait fondre rapidement et fait accélérer les particules pour les conduire sur le substrat et former un revêtement. Les revêtements par jet de plasma ont une structure plus dense que les revêtements projetés à la flamme.

Les particules peuvent atteindre une vitesse de 300 m / s, et à des températures extrêmement élevées, de 13000K à 30000K

La projection de plasma comporte l'avantage de pouvoir être projetée sur les matériaux avec des points de fusion élevés tels que la céramique ou les métaux réfractaires.

Il s'agit d'une méthode de projection polyvalente pour des revêtements de haute qualité et utilisés pour un vaste choix d'applications, y compris les revêtements sur les surfaces de traction, les revêtements pour barrière.

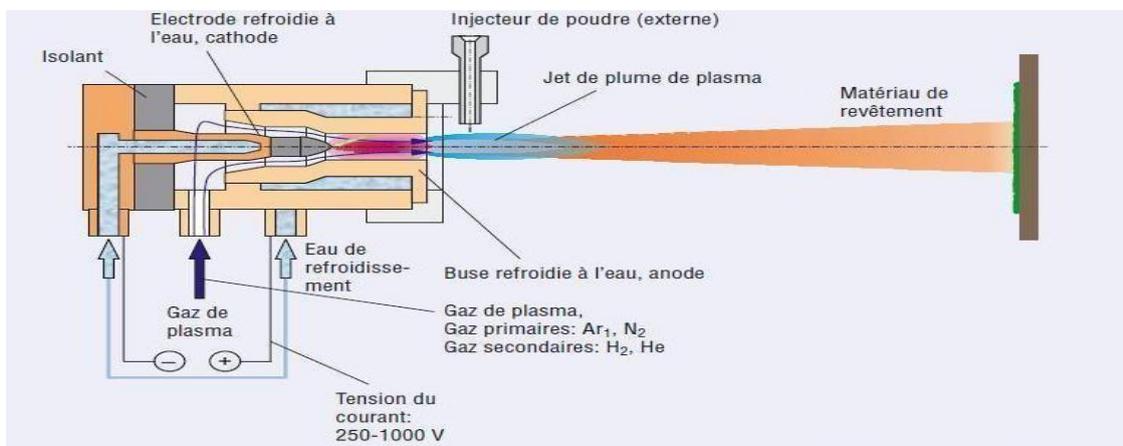


Figure II.8 Schéma de la projection plasma.

II.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 du type lamellaire. 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.

L'adhésion est assurée par un ancrage mécanique du matériau qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant la solidification.

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités a posteriori. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1 % à 25 % suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues 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).

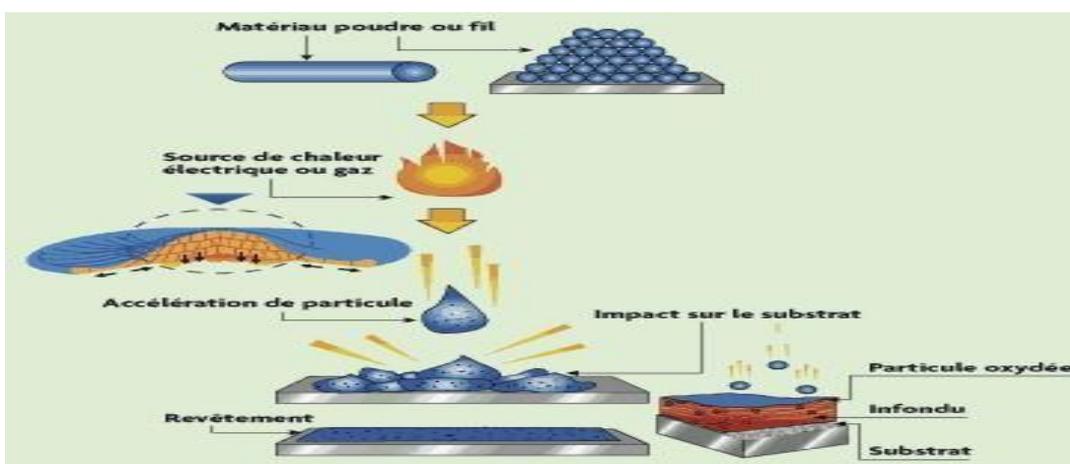


Figure II.9 Le dépôt par la projection thermique à la flamme.

II.6 Préparation de surface

Les substrats avant projection sont généralement directement issus de l'étape de découpe ou d'usinage, leur état de surface est pollué par les résidus des traitements mécaniques et par les molécules de l'atmosphère adsorbées.

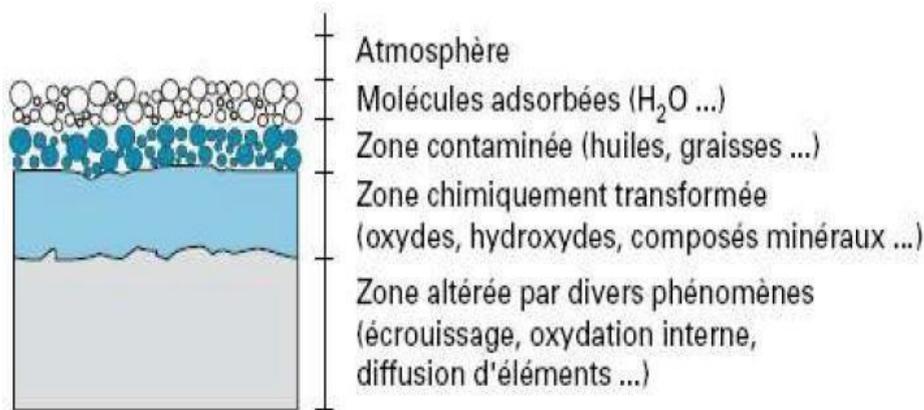


Figure II.10 Représentation schématique des contaminants d'une surface métallique.

La bonne projection exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile, cet accrochage reste toujours très insuffisant. En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement. Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir.

II.6.1 La propreté

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit. Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres). Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

II.6.2 La rugosité

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface par un bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage.

II.6.3 Le préchauffage

Un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur.

Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteinte.

II.7 Caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique

Tableau II.1 : résume et compare les principales caractéristiques des techniques de projection thermique :

Caractéristiques	Projection flamme	Arc électrique	plasma	HVOF	Canon à détonation
Température de flamme (°C)	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Vitesse des particules (m/s)	40 à 150	250	200	700	950
Taux horaire de dépôt (Kg/h)	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (%)	50 à 70	80	70	70	70
Taux de porosité (%)	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0.5 à 2	0.5 à 2
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Épaisseur déposée (mm)	0.1 à 1.5	0.2 à 3	0.05 à 1.5	0.05 à 1	0.05 à 1

Partie II Etude expérimentale du comportement à l'usure

III. Les moyens et les techniques expérimentales

III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l'étude expérimentale du comportement au à l'usure de deux types d'aciers. Les essais ont été menés sur un tribomètre pion-disque avec un mode de contact plan sur plan.

Les pions en acier 100 CR6 frottent sur des disques en acier de type E1 et E2. La pression de contact appliquées de 10 N.

Les résultats des différents essais nous ont permis de tracer la courbe de Stribeck et par la suite l'évaluation de l'usure en fonction du temps et de la rugosité des surfaces, pour une vitesse fixe de 35 cm/s L'objectif de cette étude est la mise en évidence de l'influence de la microstructure et de l'état de la surface sur le comportement à l'usure du de l'acier E1 et E2 qui ont une dureté proche après traitement thermique.

III.2 Les matériaux étudiés

Deux aciers sont utilisés dans le cadre ce travail, il s'agit d'un acier E1 utilisé en mécanique générale de par sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques, et d'un acier à outils à haute teneur en chrome. Les propriétés et la composition chimique de ces deux aciers sont données dans le Tableau III.1

Tableau III.1 Composition chimique (pds %) des échantillons

	C	Cr	S	Mn	Mo	p	si
E1	/	/	/	/	/	/	/
E2	/	/	/	/	/	/	/

Tableau III.2 Caractéristiques mécanique physique des matériaux utilisé

	Rm(N/mm ²)	Re(N/mm ²)	A%	HRC	Densité volumique □□[kg/ m ³]
E1	/	/	/	/	/
E2	/	/	/	/	/

III.3 Préparation des échantillons

III.3.1 Découpage

Les échantillons ont été découpés à partir des barres en deux acier différent à l'aide d'une scie mécanique. Les dimensions de chaque échantillon sont :

- 3 échantillons E1 en rond de dimension $d= 3.5 \text{ cm} / e= 0.9 \text{ cm}$
- 2 échantillons E2 parallépipédique de dimension : $h=0.9 \text{ cm} / l= 3.29 / b = 3 \text{ cm}$

III.3.2 Traitements de durcissement

Afin d'évaluer l'influence de la dureté sur le comportement tribologique des couples d'acier étudiés. On a en visages deux types de traitement de durcissement :

- Durcissement par trempe
- Et durcissement surfacique par revêtement dur « projection thermique d'une céramique ».

III.3.2.1 Durcissement par trempe et revenu :

Les processus de durcissement (Chauffe + Trempe) sont utilisés pour obtenir les propriétés mécaniques spécifiques d'un composant, requises pour son utilisation. Les cycles thermiques subis à l'acier E1 et E2 sont décrit dans le Tableau III.3. Les températures de revenu sont choisies en fonction de la dureté souhaitée (Figure III.1). Le revenu est appliqué dans le but de supprimer les tensions internes qui ont pris naissance lors de la trempe.

Tableau III.3 les cycles thermiques de trempe et revenu

	Température de chauffage	Refroidissement	Dureté HRC	Revenu
E1	830 °C Pendant	Dans l'eau à l'ambiante	52	Maintien à 180 °C refroidissement pendant 1h à l'air libre
E2	960°C pendant	Dans un bain d'huile	62	Maintien à 200 °C refroidissement pendant 1h à l'air libre

Etat de surface des échantillons

Des échantillons traités et non traités thermiquement doivent subir une préparation de surface par polissage avant l'analyse métallographique et les essais d'usure. Cette opération vise à rendre les surfaces uniformes et exemptes de défauts comme les stries et rugosités.

Le polissage consiste à polir manuellement la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers abrasifs en carbure de silicium (SIC) à indice de granulation progressif allant de 280 jusqu'à 1200, montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante pour éviter l'échauffement des échantillons (Figure III.2).



Figure III.2 Polisseuse de marque PresiMintech 233

La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet de réduire progressivement la rugosité des surfaces.

Après cette opération, les échantillons ont subi un polissage supplémentaire dit de finition visant à améliorer davantage l'état de surface des matériaux. Cette opération utilise des feutres spéciaux qui sont imbibés d'alumine diluée dans l'eau. La granulométrie de la poudre d'alumine était de $1\mu\text{m}$ et $0,05\mu\text{m}$. L'utilisation de différentes granulométries permet d'obtenir des résultats de polissage plus précis et plus fins. Les particules de poudre plus fines ($0,05\mu\text{m}$) permettent d'éliminer les micro-rayures et d'améliorer considérablement la finition de la surface. Les particules de poudre plus grosses ($1\mu\text{m}$) peuvent être utilisées en premier lieu pour enlever les imperfections plus grossières, puis suivies par l'utilisation de particules plus fines pour obtenir une finition plus lisse et uniforme.

Après ces opérations de polissage, l'état des surfaces est déterminé à l'aide d'un rugosimètre type Mitutoyo SJ.201M, La moyenne sur 5 mesures donne les résultats du tableau III.4 suivant :

Tableau III.4 rugosités de surface des échantillons

Echantillon	E1 : brute	E2 : brute	E3 : traité	E4 : traité
Ra (μm)	0.115	0.2975	0.09	0.58

Essai de dureté

Pour mesurer la dureté d'un matériau, un pénétrateur spécifiquement dimensionné (cône ou sphère en diamant, carbure de tungstène lié au cobalt ou acier extra-dur) est enfoncé à la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

Dans notre cas, nous avons utilisé la dureté Rockwell C (HRC). Ces essais conviennent pour les pièces plus petites et pour les duretés élevées.

La Figure III.3 montre le duromètre utilisé. Celui-ci est un appareil automatisé à écran digital pour le contrôle précis et indépendant de la force superficielle des matériaux métalliques.

Ce testeur de dureté Rockwell détecte les paramètres Rockwell HRA, HRB et HRC de matériaux tels que des alliages d'acier, acier au carbone, fer brut, ainsi que des alliages métalliques. La force d'essai s'exerce de façon automatique. La force d'essai désirée peut se sélectionner préalablement. Pour nos matériaux, nous avons utilisé une force de 150Kgf.



Figure III.3 Testeur de dureté type BUEHLER

Les duretés des différents échantillons sont les suivantes

Tableau III.5 rugosités de surface des échantillons

Echantillon	E1 : brute	E2 : brute	E3 : traité	E4 : traité
HRC	27.9	36.4	45.3	69.13

Examen métallographique au microscope optique (MO)

L'examen métallographique a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques après traitement thermique et relier la microstructure avec les caractéristiques mécaniques (de dureté).

Les examens au MO (Figure III.4) sont effectués après polissage, et nettoyage et attaque chimique au réactif approprié permettant de révéler les différentes microstructures des échantillons

Le réactif chimique utilisé pour nos échantillons est le nital à 2% qui est une solution composée de l'acide nitrique dans l'alcool éthylique (2ml d'acide nitrique avec 100 ml d'éthanol), nous avons trempé l'échantillon dans cette solution, un temps de maintien de 2 à 5 seconds suivi d'une opération de nettoyage à l'eau et d'un séchage par flux d'air sur la surface traitée.

III.3.2.2 Durcissement surfacique par revêtement en céramique

Le revêtement en céramique est appliqué par projection plasma et est utilisé comme revêtement de protection contre l'usure et aussi contre la corrosion. Le revêtement en céramique présente d'autres propriétés particulières d'isolation électrique et thermique (voir le chapitre 2 de l'état de l'art).

Préparation des échantillons pour la projection

Afin d'obtenir une bonne adhérence, les substrats utilisés en projection thermique sont préparés pas grenailage au jet d'abrasif, ce qui permet de créer une rugosité nécessaire à l'accrochage mécanique des particules (voir la Figure III.5).

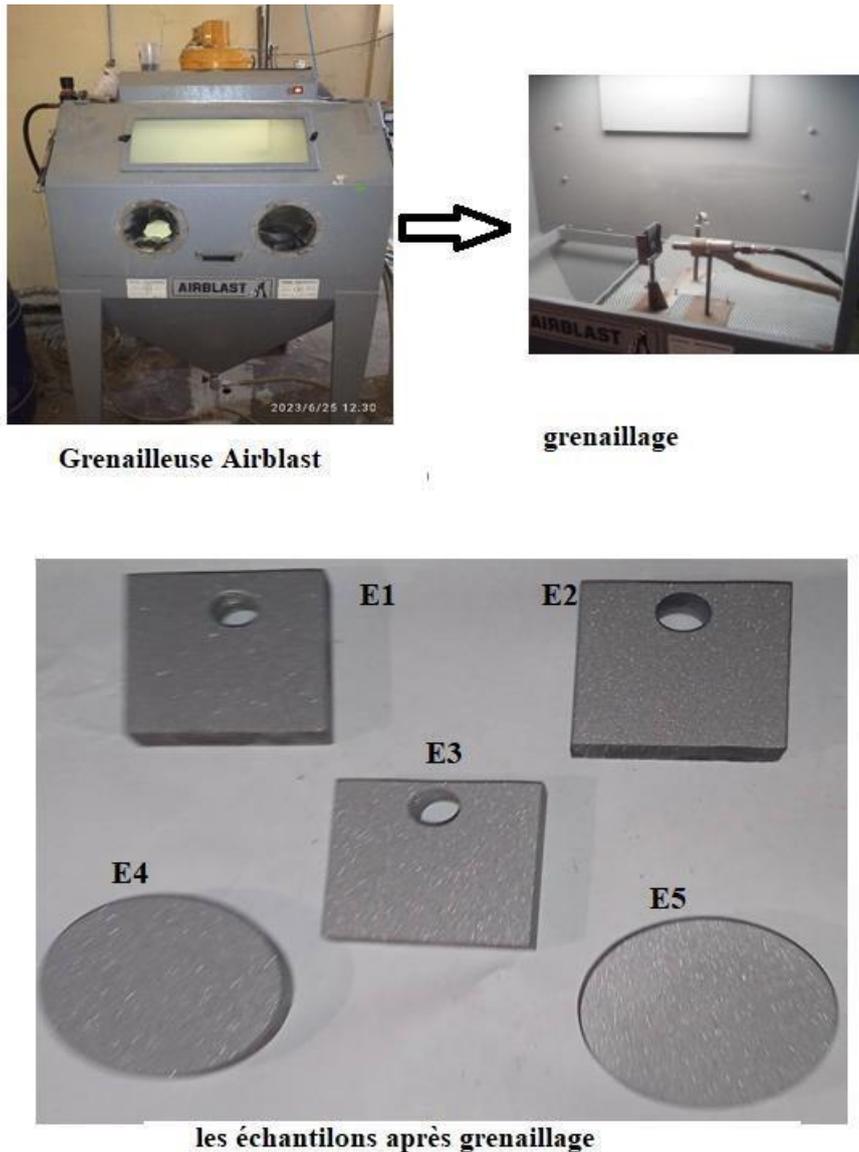


Figure III.5 Procédure de grenaillage

Le type de particules utilisé pour le grenaillage est de l'alumine brun avec une taille de « 50grit » ce qui donne une taille moyenne de particules de 1 mm de diamètre. Après le grenaillage, les plaques sont nettoyées avec à l'air comprimé.

Procédure et paramètres de projection

Les échantillons grenaillés, nettoyée, pesée sont installés sur le support pour la projection (Figure III.6)



Figure III.6 Plaque sur support avant la projection thermique

Les revêtements ont été réalisés avec une torcheoxy-acétylénique CastoDyn DS 8000 (Figure III.7).

Pistolet de projection thermique oxyacétylénique conçu pour permettre le dépôt d'une large palette d'alliages pour une grande variété d'applications. Ce pistolet peut s'utiliser en manuel mais également sur des installations robotisées.



Figure III.7 La torche à flamme CastoDyn avec ses accessoires

Les paramètres de projection utilisés lors de la projection thermique par la Castodyn8000 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

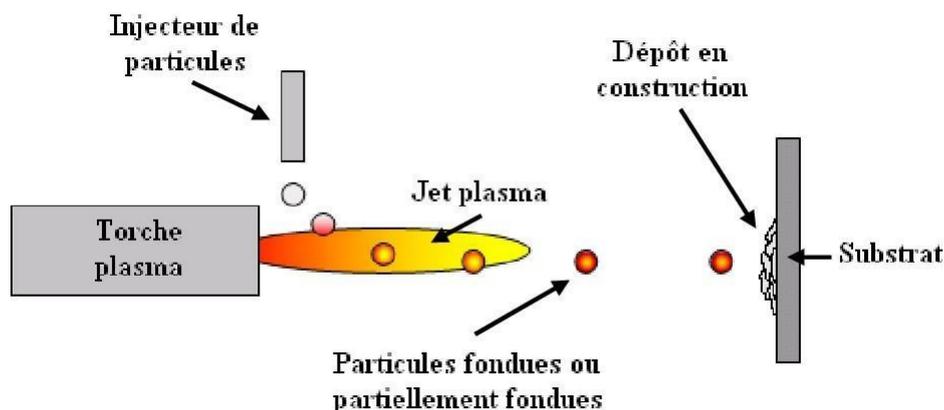


Figure III.8 Représentation schématique de la réalisation d'un revêtement par projection plasma

Il faut tout d'abord effectuer une sous-couche d'accrochage (**PROXON 21021**) d'une épaisseur d'environ 200 mm, puis réaliser le revêtement anti-usure avec la poudre **METACERAME (28030)**. Les caractéristiques mécaniques de ces poudres sont données dans le tableau

Tableau III.6 Paramètres et conditions de projections

	METACERAME (28030)	Sous-couche d'accrochage PROXON 21021
Module de projection	SSM 30	SSM 10
Réglage de porte module	3	3
Réglage de la flamme	NEUTRE	Neutre
Débit d'aire	0.6 bar	3 bar
Pression d'oxygène	4 bar	4 bar
Pression d'acétylène	0.7 bar	0.7 bar
Distance de projection	200 mm	200mm
Angle de projection	90 °	90°
Nombre de passes	5	2

Tableau III.6 Paramètres et conditions de projections

	METACERAME (28030)	Sous-couche d'accrochage PROXON 21021
Point de fusion	1950°C	700 °C
Température max de service	1000°C	250 °C
Dureté du dépôt	1600 HV/10g	140-160 HV/10g
Densité	4 g/cm ³	2.7 g/cm ³
Couleur du dépôt	Gris foncé	Gris
Couleur de la poudre à l'état libre	Blanche	/

III.4 Moyen d'étude de la résistance à l'usure

Les essais d'usure ont été menés sur un tribomètre pion-disque. Il s'agit de la méthode d'étude tribologique la plus courante. Elle a pour but de tester dans des conditions de laboratoire la résistance à l'usure d'un ensemble tribologique formé de deux matériaux, généralement en présence d'un lubrifiant.

III.4.1 Description du tribomètre pion-disque

Le tribomètre utilisé, indiqué par la figure III.9, permet de mesurer les variations de la force de frottement en fonction de la vitesse et de l'effort normal. La méthode la plus souvent utilisée est celle d'une tige qui s'appelle pion frottant sur un disque (pin-on-disk). Une force déterminée est appliquée sur le pion qui génère ainsi une piste circulaire sur la surface du disque. C'est d'ailleurs le principe utilisé dans le test standard de l'usure par l'ASTM [99].



Figure III.9 Tribomètre marque TRIBOtechnic (Pin-on-disc) utilisé

A partir des valeurs de la force de frottement, du rayon moyen de la piste de frottement du disque et la valeur de la force normale appliquée sur le pion, nous pouvons obtenir l'évolution instantanée du coefficient de frottement. L'acquisition des données se fait en continue grâce à une console d'acquisition branché sur un PC.

L'usure générée se manifeste par l'apparition d'un « plat » sur le pion appelé calotte d'usure et d'un sillon circulaire sur le disque (l'échantillon à tester). L'usure est alors caractérisée par la quantité de matériau perdue lors de ce frottement

III.4.2 Conditions de déroulement des tests

Les paramètres d'un essai tribologiques sont :

- Des paramètres opérationnels (inputs) : le type du mouvement, la force normale, la vitesse, la température initiale et la durée du test ;
- Des paramètres tribologiques (outputs) : la force de frottement, le coefficient de frottement, l'élévation de la température et le taux d'usure ;
- Des paramètres conditionnels, tels que : l'atmosphère, la topographie et la composition de la surface.

Les paramètres et les conditions d'essai utilisés sont résumées dans le tableau III.7

Tableau III.7 Les conditions des essais d'usure

Paramètres	Valeur
Vitesse de glissement (m/s) ou (en tr/min) $V = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n = (\pi \cdot 30) \cdot r \cdot n$ [m/s]	35 cm/s
Charge appliquée (Fn)	10 N
Distance de glissement (m)	200
Conditions atmosphériques	Air , humidité relative de 35%.
Température	25°C
Contact pion-disque : ponctuel (pion à bout sphérique)	Bille en 100Cr6

III.4.3 Perte de masse :

Les échantillons et la bille ont été nettoyés à l'aide d'un pinceau et pesés avant et après chaque essai tribologique par une balance de précision de 0.1mg de marque OHAUS (Figure III.10)



Figure III.10 Balance de précision de marque OHAUS

III.4.4 Calcul d'usure

Afin de calculer le taux d'usure de chaque échantillon, nous avons réalisé des mesures de la masse avant et après chaque essai tribologique à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\Delta m = m_i - m_f \dots \dots \dots (eq.1)$$

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot d \cdot F_n} (\text{mm}^3 / \text{N.m}) \dots \dots \dots (eq2)$$

Où :

m_i : la masse initiale (g) m_f

: la masse finale (g)

ρ : la masse volumique (g/cm³)

D : la distance parcourue (m)

F_n : la charge normale appliquée (N)

Les pions ont été pesés initialement (avant l'essai d'usure) et à la fin de l'essai. Ils ont été essuyés à l'abri des particules d'usure. La différence de masse du pion, avant et après l'essai, est calculée par la formule (eq1), et le taux d'usure (Wear) W est calculé par rapport à la distance de glissement parcourue Lg par la formule suivante :

$$W = \Delta m / \rho \cdot Lg \dots \dots \dots (eq.3)$$

Où : ρ est la masse volumique de la bille.

Chapitre IV

Résultats et discussion

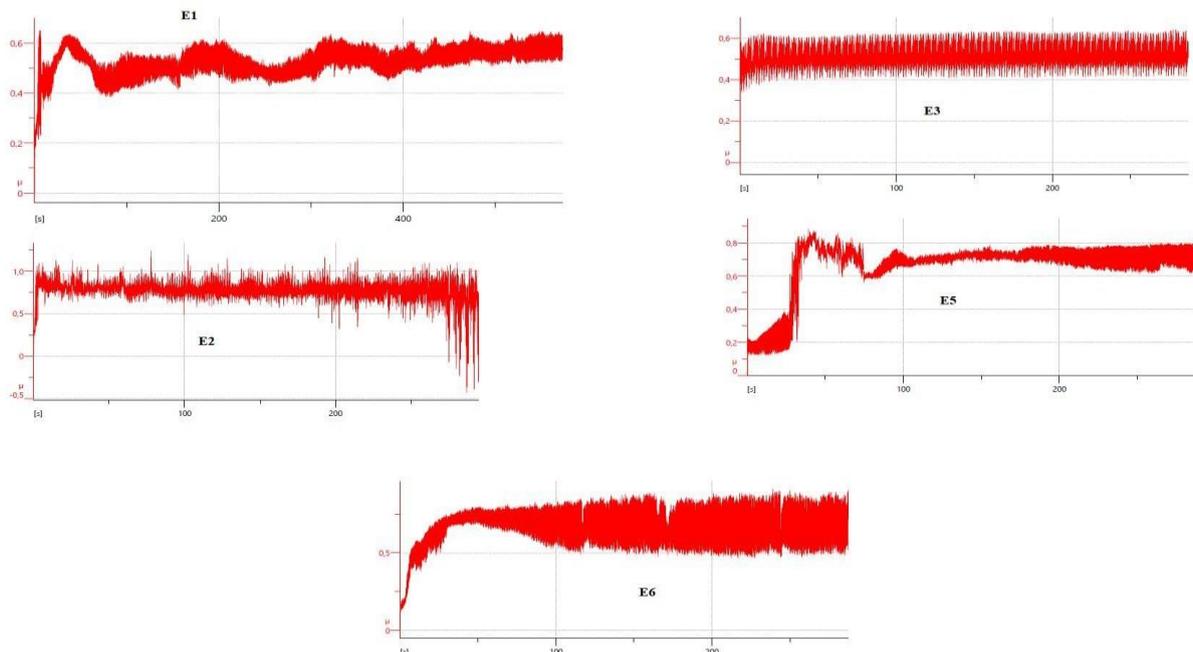
INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude suivi d'une discussion et des interprétations afin d'établir des relations entre les résultats de déposition thermique et les propriétés mécaniques et tribologiques.

IV.1 Analyse Microstructurale des différents substrats

IV.2 les résultats des essais d'usure

La variation du coefficient de frottement en fonction du temps est illustrée par les figures IV.2. Le coefficient de frottement connaît une période de rodage pendant la première centaine de mètres suivie d'un régime de frottement relativement stable.



Figures IV.2 La variation du coefficient de frottement en fonction du temps

IV.3 Observation des faciès de dégradation des pistes

Le figure IV.3 présentent les macrographies des pistes d'usure par frottement des différents échantillons et des billes. Nos observations sont résumées comme suivant :

L'échantillon E1 (de base)

La piste est plus au moins fine avec des rayures continues, dans la zone centrale, entourée de deux zones relativement plates. Sur la surface de contact de la bille, on observe des rayures profondes dans la zone centrale et une couche de matière d'épaisseur irrégulière au niveau du bord d'attaque. Il s'agit d'une usure adhésive : En raison des pressions de surface locales parfois élevées, les aspérités de rugosité (ici $R_a = 0.115 \mu\text{m}$) sont éliminées ou déformées élastiquement, ce qui entraîne des liaisons d'interface locales.

Echantillon E2 : durci

La piste d'usure est très large avec des sillons profonds de part et d'autre de la trajectoire des rayures intérieurs en continu. Ces sillons et rayures sont dus au déplacement de débris de matière par labourage. Ces débris d'usure enfermés entre les deux corps (bille-substrat) sont formés par une matière fortement écrouie qui raient la surface de contact. L'observation de la surface active de la bille montre, en effet, des traces d'usure de labourage.

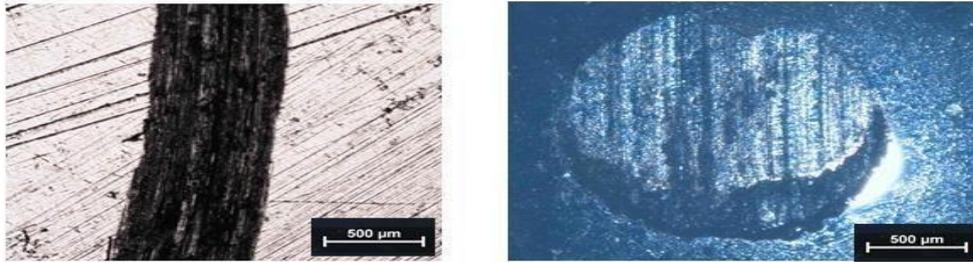
Ce phénomène de déplacement de matière par labourage se manifeste lorsque la taille des aspérités de contact du matériau moins dur (dans ce cas de ce substrat $R_a = 9\mu\text{m}$) est suffisamment importante et dans ce cas les surfaces en contact ne se touchent qu'aux pointes des aspérités. Lorsqu'un mouvement relatif les anime, les aspérités se déforment élastiquement et plastiquement formant une matière écrouie et entraînée par le glissement du pion et laissant à la fin des sillons larges et profonds.

Echantillon E3 (revêtu)

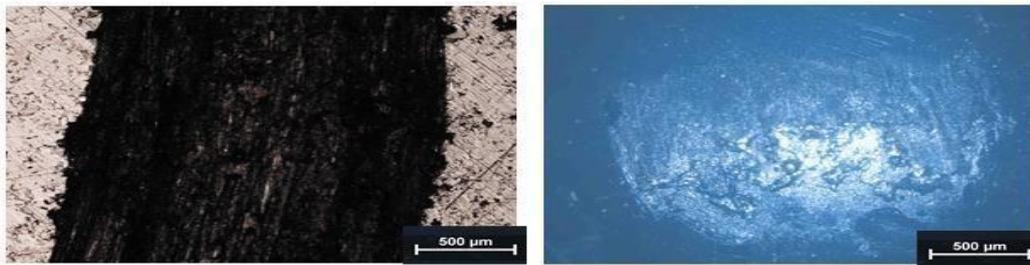
Il s'agit du substrat revêtu d'une couche de céramique d'épaisseur $1185.6\mu\text{m}$ dans ce cas, la piste d'usure est pratiquement inobservable à l'œil nu cependant les macrographies révèlent un affinement de la texture du revêtement le long de la piste et en quelques endroits de la piste on observe des zones claires orientées dans le sens du déplacement de la bille. On pense que ces taches claires sont dues à l'arrachement des carbures de la matrice. Par contre, la bille présente une texture à forte rayures. Ceci s'explique par le fait que le revêtement présente une dureté plus importante que le matériau de la bille.

Dans le cas des deux autres échantillons E5 et E6 pratiquement les mêmes observations faites que dans les deux cas E1 et E2.

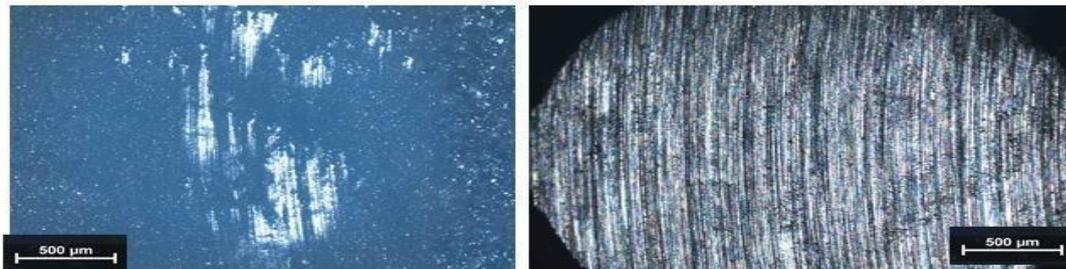
Echantillon E1



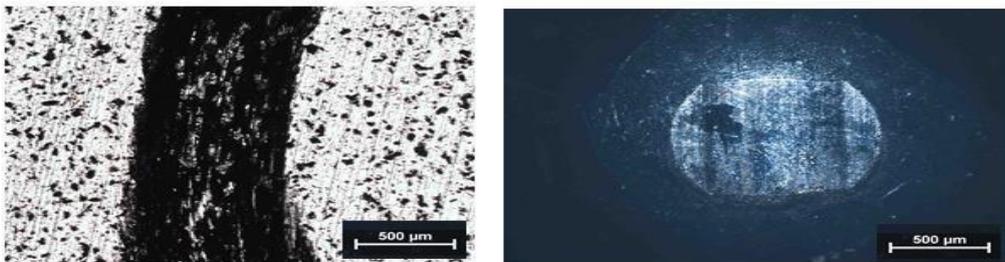
Echantillon E2



Echantillon E4



Echantillon E5



Echantillon E6



Figure IV.2 Trace d'usure du substrat et de la bille

E5 (non-traité), la piste est plus large avec des rayures discontinues et brillantes. La surface active de la bille paraît plus rugueuse et déformé.

E6 (traité) présente une piste très fine et régulière avec une zone centrale avec rayures continues entourée de deux zones relativement plates et intactes définies par les rebords du tas de débris. Quant à la surface de contact de la bille, celle-ci présente des rayures assez larges et une zone foncée au rebord de la surface active.

IV.4 Analyse du taux d'usure

L'analyse de la perte de masse par l'usure par frottement nous donne les résultats du tableau IV.1 suivant. On remarque, en effet qu'un traitement thermique améliore la résistance à l'usure. La faible différence entre la perte de masse entre le E2 et E3, vient du phénomène de vibration de la bille au cours de l'essai. En effet l'échantillon revêtu présentait un état de surface trop rugueux (1.445) une forte rugosité de surface

Tableau IV.1 rugosité et Perte de masse par l'usure

Échantillon	Ra moy (μm)	Masse initiale m_i (g)	Masse finale m_f (g)	Taux de perte de masse % $(m_i - m_f / m_i) * 100$
E1 : non traité	0.115	75.1934	75.1136	0.1061
E2 : traité	0.9	72.588	72.5457	0.0582
E5 : non traité	0.517	70.2444	70.8969	0.1241
E6 : traité	0.58	70.5446	70.5347	0.0014
E3 : revêtu	1.445	76.9283	76.8913	0.0480

IV.5 L'évolution du coefficient de frottement dynamique.

L'évolution du coefficient de frottement dynamique des différents couples échantillons/bille (**100Cr6**) est présentée dans la figure IV.4.

Pour tous les échantillons, on note une forte montée dans les premières minutes avant la stabilisation jusqu'à la fin de l'essai : Il s'agit de la phase de rodage, celle-ci diffère de l'état de l'échantillon à l'autre. On remarque que la vitesse de montée est plus rapide dans le cas des échantillons E1 E2 et E3 par contre est plus lente du cas des échantillons en acier (E5 et E6).

Les coefficients de frottement dynamique des différents échantillons sont donnés dans le tableau IV.2 suivant

Tableau IV.2 Coefficient de frottement dynamique des échantillons

Échantillon	min	Max	moye	Ecart type
E 1	0.005	0.665	0.529	0.057
E 2	0.432	1.247	0.777	0.121
E 3	0.025	0.665	0.520	0.060
E 5	0.008	0.900	0.664	0.164
E 6	0.003	0.913	0.667	0.130

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail entrepris dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale s'inscrit dans le cadre d'une étude de l'influence de l'état du traitement thermique de l'acier sur les propriétés d'usure.

Pour cette étude, on a considéré deux types d'aciers : acier au carbone et un acier à outil. Un couple de ces aciers a subi un traitement thermique de trempe pour varier leur dureté dans la masse et un couple en acier qui a subi un traitement de surface par projection thermique d'une céramique. Les essais ont été réalisés sur un tribomètre de type pion/disque à sec sous les conduits à sec sous les conditions de température et charge constante. Les résultats obtenus montrent que :

- L'état de traitement thermique de l'acier influe sur les propriétés d'usure. En effet, pour différents traitements thermiques, on a différentes pertes de masse.
- La rugosité et dureté de surface influent sur le régime d'usure et sur le coefficient de frottement. Les échantillons revêtus avec une couche de céramique, montre un faible coefficient d'usure par rapports aux autres substrats nus et un régime d'usure abrasifs.
- Que le coefficient de frottement est assez grand au démarrage du mouvement, il diminue et stabilise à la fin de l'essai.
- Les caractéristiques des endommagements observées sur la face usée des pions et sur les pistes de frottement suggèrent que dans la majorité des cas (échantillons nus), l'usure se développe simultanément par adhésion et abrasion.
- Par contre, dans le cas des échantillons revêtus, l'observation des surfaces usées montrent une prédominance de l'usure par abrasion et un transfert de métal du matériau le moins dur vers le matériau le plus dur.

Perspectives :

Pour compléter ce travail, on propose une étude plus approfondie sur l'influence des différents paramètres tels que la charge, et la vitesse de glissement

Références bibliographiques

[1] les aciers dans la construction Achevé d'imprimer en octobre 2006 par l'imprimerie CUSIN-38300 Meyrie

[2] Archard J.F., J.appl.phys.29, p, 981, 1953

[3] CD4.pdf

[4] M119224.pdf

[5] <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/3436/1/PFE-Final.pdf>

