

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par :

MESSAAD Taieb & ZOUAK Mohammed

Thème

ETUDE DE L'USURE DES MATERIAUX SOLIDES

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
DEBIH Ali	MCA	Président
BOUDILMI Aissa	MCA	Encadreur
ELHADI Abdelmalek	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../2022

Remerciements

Nous remercions Dieu qui nous a donné le pouvoir et nous a aidé à terminer ce modeste travail, et nos très chers parents Qu'ALLAH les protèges. Qui nous ont soutenus avec tous les moyens pour assurer notre réussite. N'oublies pas nos chers amis et collègues Et particulièrement les plus intimes

Nous remercions les plus sincères vont à notre encadreur, Mr A. Boudilmi pour avoir bien voulu nous encadrer et pour ses précieux conseils et orientations. Nous le remercions d'avoir su partager son expérience et sa passion notamment dans le domaine mécanique.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui nous ferons l'honneur d'examiner notre travail.

A tous les professeurs et les étudiants du département de Génie Mécanique. A tous, nous disons merci !

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont créé le bon climat et tous les moyens pour terminer mes études. Mes frères et sœurs, surtout mon cher frère Khaled qui était le compagnon de ma vie.

Mohammed Zouak

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui me reconnaissent et qui m'ont aidé et contribué à la réalisation de ce travail, surtout mes très chère parents qu'Allah les protégé, à mon frère compagnon de ma vie Ahmed,

Ma famille et mes amis

Taieb Messaad

Sommaire

Remerciements**Dédicace****Sommaire****Listes des figures****Résumé****Introduction générale.....2****Chapitre I Etude bibliographique de tribologie****I.1. Introduction.....5****I.2. les surfaces des matériaux.....5**

I.2.1. Définition du surface.....5

I.2.2. Structure des surfaces.....6

I.2.3. Profile du surface7

I.2.4. Types du surface.....8

I.2.4.1. Surface géométrique8

I.2.4.2. Surface spécifiée.....8

I.2.4.3. Surface réelle8

I.2.4.4. Surface mesurée.....8

I.3. Contact surfacique8

I.3.1. Définition du contact surfacique8

I.3.2. Contact élastique9

I.4. Frottement.....9

I.4.1. Définition de frottement.....9

I.4.2. Phénomène de frottement.....10

I.4.3. Force et coefficient de frottement10

I.4.4. Types du frottement11

I.4.4.1. Frottement sec.....11

I.4.4.2. Frottement hydrodynamique.....12

I.4.4.3. Frottement onctueux12

I.4.4.4. Frottement de glissement.....12

I.4.4.5. Frottement de roulement.....14

Chapitre II Généralités sur l'usure**II.1. Introduction16**

II.2. Définition.....	16
II.3. Mécanismes d'usure	16
II.4. Types d'usure	17
II.4.1. Usure adhésive	18
II.4.2. Usure abrasive.....	19
II.4.3. Usure corrosive	20
II.4.4. Usure par fatigue.....	21
II.5. Facteurs d'usure.....	21
II.5.1 Mode de contact.....	21
II.5.2. Etat des surface.....	22
II.5.3. Charge	22
II.5.4. Vitesse.....	22
II.5.5. Environnement	22
II.5.6. Nature des matériaux	22
II.6. Les effets d'usure.....	22
II.7. Mesure de l'usure	22
II.8. Les solutions pour lutter contre l'usure	23
Chapitre III Mécanismes d'usure et relations dureté - usure abrasive	
III.1. Introduction	25
III.2. Usure abrasive	25
III.3. Types d'usure abrasive.....	25
III.3.1. Usure abrasive à deux corps	26
III.3.2. Abrasion à trois corps fermée	26
III.3.3. Abrasion à trois corps ouverte	27
III.4. Paramètres caractéristiques de l'usure abrasive	28
III.4.1. Paramètres de sollicitation.....	28
III.4.2. Paramètres du processus d'abrasion	29
III.5. Essais d'abrasion	30
III.6. Mécanismes d'usure abrasive.....	30
III.7. Effet du glissement répétitif	30
III.7.1. Glissement mono passe	30
III.7.2. Glissement multi-passe.....	32
III.8. Modélisation de l'essai de rayage	33
III.8.1. Description de l'essai de rayure.....	33
III.8.2. Les paramètres mécaniques imposés	34
a) Déformation	34
b) Vitesse de déformation	35

III.8.3. Grandeurs mesurées.....	35
III.8.4. Calcul du coefficient de frottement apparent et local – modèles analytiques	36
Chapitre IV Modélisation de l'essai d'usure abrasive	
IV.1. Introduction.....	38
IV.2. Calcul de la section de rayure	38
IV.2.1. Rayage avec le bout sphérique et une partie du cône ($h > R(1-\cos\theta)$).....	38
IV.2.2. Rayage avec le bout sphérique ($h \leq R(1-\cos\theta)$)	38
IV.3. Calcul de l'effort normal et tangentiel	39
IV.3.1. Rayage avec le bout sphérique ($h \leq R(1-\cos\theta)$)	39
IV.3.2. Rayage avec le bout sphérique et une partie du cône ($h > R(1-\cos\theta)$).....	39
IV.4. Les modèles de calcul du coefficient de frottement.....	40
IV.4.1. Modèle de Bowden et Tabor	40
IV.4.2. Modèle (Bowden et Tabor amélioré)	42
IV.5. Modèle de comportement en 3D.....	43
Conclusion générale	49
Bibliographie	50

Listes des figures

Chapitre I Etude bibliographique de tribologie

Figure I.1. Surfaces des solides.....	6
Figure I.2. Différentes couches en surface d'un solide métallique [3].	7
Figure I.3. Profile d'une surface.....	7
Figure I.4. Creux et crêtes du profile d'une surface.....	8
Figure I.5. Exemples de contacts surfaciques : a) Prothèse de hanche, b) Garniture mécanique (source : Latty International).....	9
Figure I.6. Solide sur un support horizontal.....	10
Figure I.7. Force de frottement [10].....	11
Figure I.8. Frottement hydrodynamique.	12
Figure I.9. Frottement onctueux.....	12
Figure I.10. Aires de contact réelle et apparente.....	13
Figure I.11. Frottement de roulement.....	14
Figure I.12. Aire de contact.....	14

Chapitre II Généralités sur l'usure

Figure II.1. Mécanismes d'usure : (A) déformation élastique, (B) déformation plastique, (C) cisaillement.....	17
Figure II.2. Exemples des différents types d'usure.....	18
Figure II.3. Usure adhésive.	19
Figure II.4. Les quatre modes d'usure abrasive.	20
Figure II.5. Usure abrasive.....	20
Figure II.6. Etat de surface après une usure corrosive.	21
Figure II.7. Usure par fatigue.	21

Chapitre III Mécanismes d'usure et relations dureté - usure abrasive

Figure III.1. Abrasion à deux corps.....	26
--	----

Figure III.2. Abrasion à trois corps fermée : (a) $D < D_{\max}$ grain et (b) $D > D_{\max}$ grain.....	27
Figure III.3. Abrasion à trois corps ouvert.	28
Figure III.4. Définition du degré d'usure selon Kato.	31
Figure III.5. Degré d'usure en fonction du degré de pénétration.	32
Figure III.6. Transitions des modes d'usure dans le cas de glissement répétitif.....	33
Figure III.7. Paramètres géométriques pour un indenteur : (a)sphérique (b)conique [39].....	34
Chapitre IV Modélisation de l'essai d'usure abrasive	
Figure IV.1. Représentation des contraintes de contact lors de la rayure	43
Figure IV.2. (a) surface de contact et différentes variables associés, (b) relation entre la direction d'écoulement du matériau et $\eta\theta$, (c) l'effort de cisaillement et les flux d'écoulement du matériau pour $\beta \rightarrow 0^\circ$ [48].	44

Résumé

La Tribologie est la science qui s'intéresse au frottement, à l'usure, à la lubrification et au contact. Le mémoire qui on a réalisé est appartient de cette science elle s'agit d'étudier l'influence de l'usure des matériaux solides. Nous avons concentré dans notre travail sur le type d'usure a abrasion.

En se basant dans notre étude sur l'analyse des résultats des testes tribologiques et les essais déjà obtenus par de chercheurs.

ملخص

علم الاهتراء هو العلم الذي يهتم بالاحتكاك والتآكل والتزييت والتماس كذلك.

المذكرة التي انجزناها تدرج في هذا العلم و هي دراسة تأثير التآكل على المواد الصلبة.

استندنا أثناء دراستنا على تحليل النتائج التي تم الحصول عليها من طرف الباحثين فيما يتعلق بالاختبارات التريبولوجية و العديد من التجارب.

Introduction générale

Introduction générale

Dans l'industrie, il existe un très grand nombre d'applications qui font appel à des mécanismes dans lesquels deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ces mécanismes sont souvent soumis à des phénomènes de frottement et d'usure qui touchent à titre d'exemple les pièces en mouvement tels que les roulements, les galets et les coussinets.

La présence d'usure dans les corps peut être l'origine d'une réduction de l'efficacité du système mécanique voire être responsable de l'invalidité de ce système. Il faut noter que 11% de la consommation énergétique totale des Etats-Unis est perdue à cause d'usure.

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 est beaucoup moins restrictive car elle s'applique plus généralement à tout événement conduisant à une perte de fonction des composants ou systèmes, ce point de vue corroborant d'ailleurs les définitions plus communes qui associent à l'usure la détérioration due à l'usage.

La perte de fonction correspond aux dysfonctionnements qui peuvent résulter :

- des évolutions dimensionnelles, géométriques des pièces, telles que l'accroissement des jeux dû à une perte de cote (dégradation de la précision...) ou au contraire, le colmatage des interfaces par l'accumulation de débris (blocage, coincement...) ;
- des phénomènes de dégradation des surfaces (rayures, sillons, cavités, excroissances...) dont l'influence peut être dommageable à plusieurs égards : déficience d'une étanchéité, altération des propriétés mécaniques des composants ou encore détérioration de l'aspect...

Ceci étant, l'usure est un phénomène redoutable qui fait peur aux industriels, car les pertes qu'il engendre peuvent entraîner les machines industrielles et les pièces mécaniques au l'endommagement.

Pour faire face à ce phénomène omniprésent et minimiser ses conséquences dévastatrices, les chercheurs de tout temps ont mis au point des remèdes et des techniques qui ont pour but la protection des équipements et le prolongement de leur durée de vie.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique de la tribologie particulièrement les surfaces des contacts et le frottement.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté des généralités sur l'usure. Nous avons décrit les mécanismes, types, et des facteurs. En plus de mentionner quelques solutions pour lutter contre l'usure.

Le troisième chapitre s'agit d'étudier un des types de l'usure, précisément l'usure abrasive et leurs mécanismes, les paramètres caractéristiques et l'essai d'abrasion.

Au quatrième chapitre, l'étude a été concentrée sur les modélisations de l'essai abrasif. Notre mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Etude bibliographique de la
tribologie

I.1. Introduction

L'usure est principalement le sujet de cette étude, elle se trouve souvent corrélée à des notions de frottement ou de lubrification. Ce phénomène s'inscrit dans une science plus vaste : la tribologie.

Le mot "tribologie" a été créé à l'instigation des Anglais en 1968 et n'est apparu dans le dictionnaire français qu'en 1974 [1]. L'étymologie du mot est grecque : "tribos" frottement, "logos" étude. La tribologie est définie par M. Godet, comme la science qui permet le mouvement, et par Salomon, comme l'étude des surfaces en contact animées d'un mouvement relatif.

La tribologie regroupe en fait trois aspects distincts :

- **L'usure**, conséquence du frottement, se traduit par une perte de matière. Elle ne peut pas être évitée mais seulement réduite ou contrôlée. En général, l'usure est combattue car elle affecte la durée de vie des pièces.

- **Le frottement sec**, qui se traduit par un effort tangentiel qui s'oppose au déplacement. Cet effort contribue à des pertes d'énergie et par ce biais affecte le rendement des machines. Il peut aussi être utile et donc amplifié, quand il s'agit de dissiper rapidement de l'énergie (freinage).

- **La lubrification**, qui se caractérise par l'interposition d'un fluide entre deux surfaces animées d'un mouvement relatif. Son formalisme, établi en 1886 par O. REYNOLDS, est de nos jours très en avance par rapport à celui du frottement sec.

I.2. les surfaces des matériaux

I.2.1. Définition du surface

Une surface solide est la frontière entre un solide et un autre milieu, tel qu'un autre solide, un gaz (comme une atmosphère) ou un liquide (un lubrifiant par exemple), la figure I.1 présente un exemple d'une surface de contact

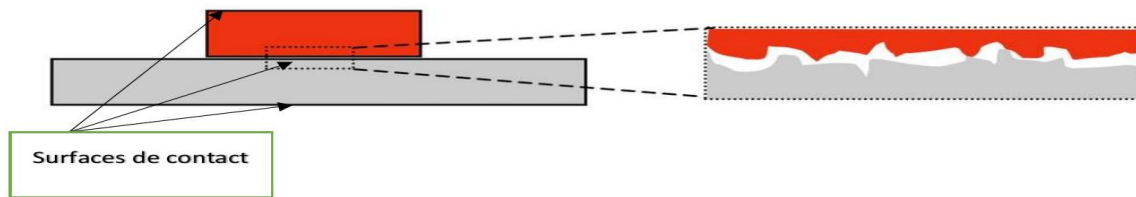


Figure I.1. Surfaces des solides.

I.2.2. Structure des surfaces

On peut définir la surface tribologique par une séparation qui a une épaisseur entre le milieu extérieure et un corps solide. Qui s'étend de l'extérieure vers l'intérieure du solide [2].

Par l'examinations des surface, on peut d'identifier différent couches profondément dans la matière [3].

- **Gaz adsorbés (0.3 à 3nm)**

Les composants de cette couche se sont des molécules de gaz, vapeur d'eau, oxygène qui été adsorbées par le solide. Ces molécules restent réparties sur la surface grâce à les interactions de Van der Walis.

- **Couche d'oxyde (10 à 100 nm)**

Cette couche d'oxyde est formée par la réaction des métaux avec l'oxygène.

- **Couche de Beilby (1 à 100 nm)**

La structure cristalline de cette couche n'est pas la même dans la matière principale.

- **Couche déformée (1 à 100 μ m)**

A cause des procédés de fabrication, cette couche est affectée des contraintes résiduelles.

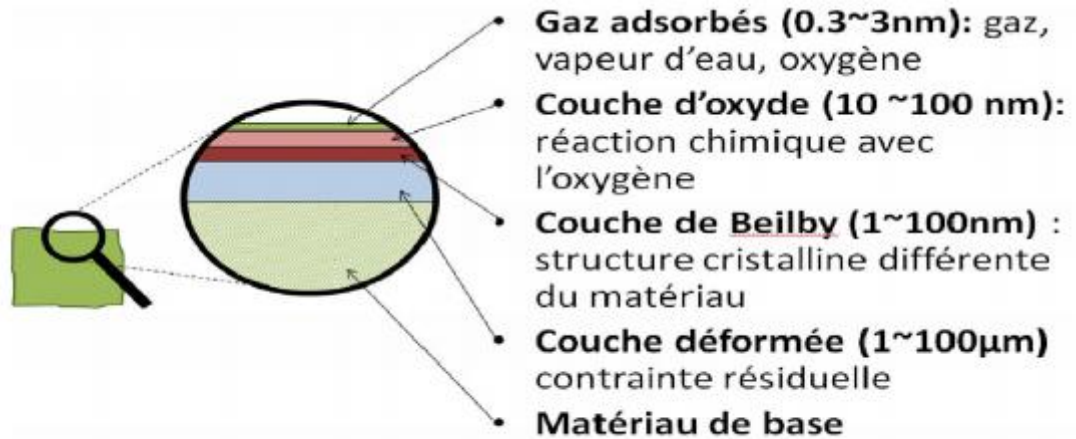


Figure I.2. Différentes couches en surface d'un solide métallique [3].

I.2.3. Profil du surface

Une surface géométrique et une ligne d'intersection des plans de coupe (figure I.3). Un profil de surface agrandi révèle les défauts de surface [4].

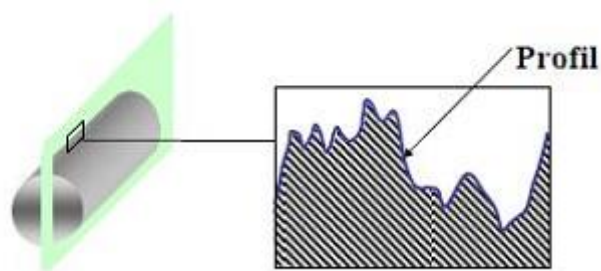


Figure I.3. Profil d'une surface.

En ramenant les facteurs d'amplification en x et y, les sommets du profil s'appellent crêtes ou aspérités et les fonds s'appellent creux (figure I.4).



Figure I.4. Creux et crêtes du profil d'une surface.

I.2.4. Types du surface

I.2.4.1. Surface géométrique

C'est une surface impeccable. Le bureau d'études utilise les cotes nominales pour les désignent géométriquement sur le dessin.

I.2.4.2. Surface spécifiée

Elle est la conséquence de la conversion de la surface géométrique par le bureau d'études, qui définit les limites pour atteindre cette surface à l'aide des dimensions nominales du dessin, ainsi que les symboles et de valeurs numériques.

I.2.4.3. Surface réelle

Nous pouvons l'obtenir au cours de fabrication.

I.2.4.4. Surface mesurée

C'est le résultat d'un examen de surface réel avec des appareils de mesure. Le degré auquel la surface mesurée se rapproche de la surface réelle est déterminé par la technique de mesure utilisée et la précision de l'équipement de mesure utilisé.

I.3. Contact surfacique

I.3.1. Définition du contact surfacique

Si le domaine théorique sur lequel s'établit le contact est une surface d'aire non nulle (contrairement à un contact situé sur un point ou une droite) veut dire on parle d'un contact surfacique. Lorsqu'un contact est introuvable, il devient surfacique. Le contact surfacique peut prendre de nombreuses formes. Deux cas sont représentés dans la figure 1.5 : contact sphère-sphère dans une prothèse de hanche ou plan sur plan dans une garniture mécanique. Le contact se produisent sur le sommet des aspérités n'est pas sur toute l'aire théorique de contact.



Figure I.5. Exemples de contacts surfaciques : a) Prothèse de hanche, b) Garniture mécanique (source : Latty International)

I.3.2. Contact élastique

Afin de faciliter le calcul des caractéristiques d'un contact élastique, Heinrich Hertz a imposé en 1881, une théorie bien connue en mécanique du contact [5]. Les hypothèses sont les suivantes :

- Les surfaces sont lisses, continues (rayons de courbure R sont différents)
- Les valeurs des déplacements et déformations ne sont pas grandes.
- Chaque solide est un demi-espace infini élastique linéaire.
- Le contact est effectué avec frottement nul.

I.4. Frottement

I.4.1. Définition de frottement

Le frottement est défini comme la résistance au mouvement qui se produit lorsque deux surfaces en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre.

Les normes définissent la force de frottement comme la force de résistance tangentielle à l'interface entre deux corps lorsqu'un corps se déplace ou tend à se déplacer par rapport à un autre sous l'action d'une force extérieure [6].

Le frottement est un processus dissipatif, et l'énergie peut se présenter de différentes manières : déformation (élastique, plastique), rupture (fissuration, émission de débris (échauffement, réactions chimiques (adhésion, oxydation), phénomènes acoustiques, vibrations, bruit), électricité statique et étincelles [7].

I.4.2. Phénomène de frottement

Sur un plan horizontal, considérant un mouvement rectiligne on a un corps mobile de masse m . Il subit de deux forces la première c'est son propre poids selon l'axe (Oy) et une force u selon l'axe (Ox) , Comme la figure I.6 représente.

N'importe quelle matière d'un solide, sa surface n'est pas totalement lisse ; il est rugueux avec des défauts causés par l'usinage ou même par la nature. Lorsque deux composants mécaniques en contact bougent un par un, leurs aspérités se déforment et se heurtent en perdant de l'énergie.

Le frottement est une représentation macroscopique de cette énergie. Selon les matériaux utilisés, il y aura soit des déformations élastiques plus importantes, soit davantage de chocs susceptibles de déchirer le matériau [8].

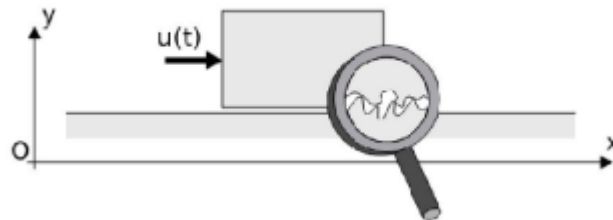


Figure I.6. Solide sur un support horizontal.

I.4.3. Force et coefficient de frottement

La figure I.7 ci-dessus représente deux corps en contact et F la force normale entre eux. L'expérience a montré qu'il est possible d'appliquer une force T parallèle à la surface de contact sur la pièce (2) sans qu'elle se déplace. En conséquence, le corps (1) applique une force F^- sur le composant (2) qui est capable de s'opposer T et d'arrêter le mouvement [9].

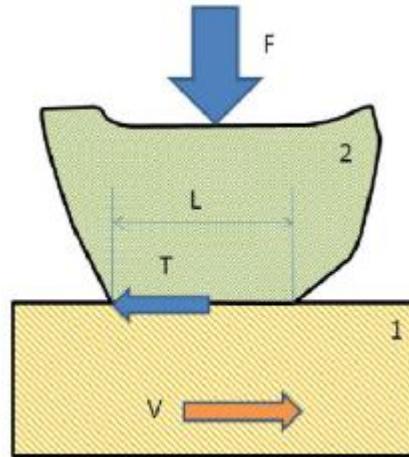


Figure I.7. Force de frottement [10].

Le frottement dynamique se produit lorsque la vitesse de glissement V diffère de zéro.

Le frottement statique se produit lorsque la vitesse de glissement V est nulle. Alors notre intérêt principale sera le frottement dynamique.

Le coefficient de frottement μ est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale appliquée au point de contact entre les deux corps :

$$\mu = T/N. \quad (\text{I.1})$$

I.4.4. Types du frottement

I.4.4.1. Frottement sec

Le frottement sec fait référence à tous les processus qui se produisent dans la zone de contact entre deux corps lorsqu'il n'y a pas de liquide lubrifiant s'opposant à leur coulissement. Si un glissement relatif se produit entre les deux corps liés, nous avons un frottement dynamique ; si cela ne se produit pas, nous avons un frottement statique.

Le principe de modèle de Bowden et Tabor [10] dit que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est né à cause de deux processus physiques fondamentaux : Le cisaillement des micro-jonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [11.12]

$$F_t = F_{ad} + F_{def} \quad (\text{I.2})$$

I.4.4.2. Frottement hydrodynamique

Dans cette forme de frottement, les surfaces sont en mouvement relatif et ne sont pas en contact avec leurs aspérités car elles sont séparées par un film épais de lubrifiant (figure I.8). Le coefficient de frottement est faible et cette forme de frottement est recommandée pour une utilisation à grande vitesse ou lorsque la force normale est élevée. [12].

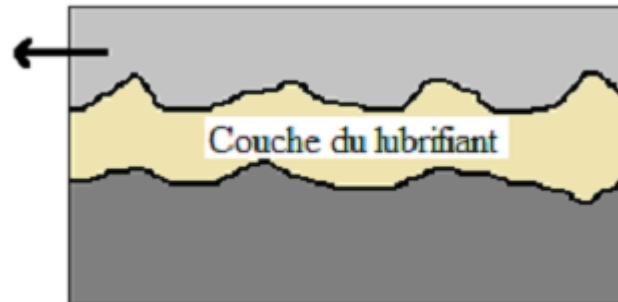


Figure I.8. Frottement hydrodynamique.

I.4.4.3. Frottement onctueux

C'est le frottement entre le frottement sec et le frottement hydrodynamique. la couche liquide absorbée en surface ou générée par réaction chimique est très fine (figure I.9). L'efficacité de ce film est déterminée par son adhérence à la surface. Le coefficient de frottement est plus faible dans cet environnement que dans le sec. [13].

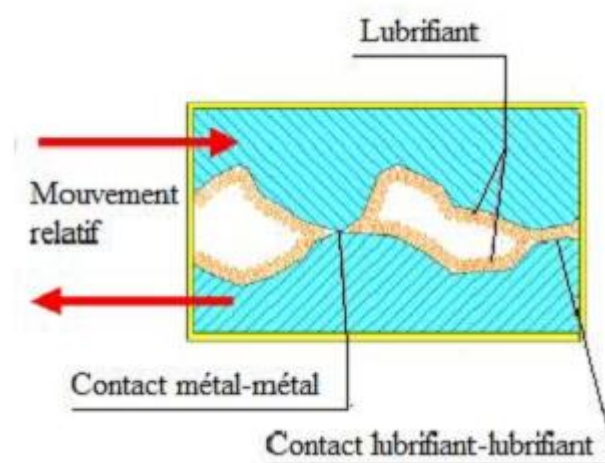


Figure I.9. Frottement onctueux.

I.4.4.4. Frottement de glissement

La déplacement du surface d'un corps solide sur une surface d'un autre corps solide, a l'absence de roulement ,ce type dit le frottement de glissement et c'est le type le plus fréquent on peut

énumérer quelques exemples : un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier et un traîneau glissant sur le sol produisent un frottement de glissement.

Pendant ses études, Léonard de Vinci trouve que la force de frottement de glissement F_{fg} est indépendante de l'aire de contact. D'autre part, elle est associée avec la rugosité des deux surfaces.

Lorsque deux corps sont mis en contact, les surfaces se touchent d'abord aux sommets des rugosités situées sur la crête des ondulations. Ceci établit un certain nombre de points de contact, ce qui définit l'aire apparente de contact (A_a), et l'aire réelle de contact (A_r). Dans la pratique $A_r \ll A_a$, comme l'indique la figure 1.10. [14-15].

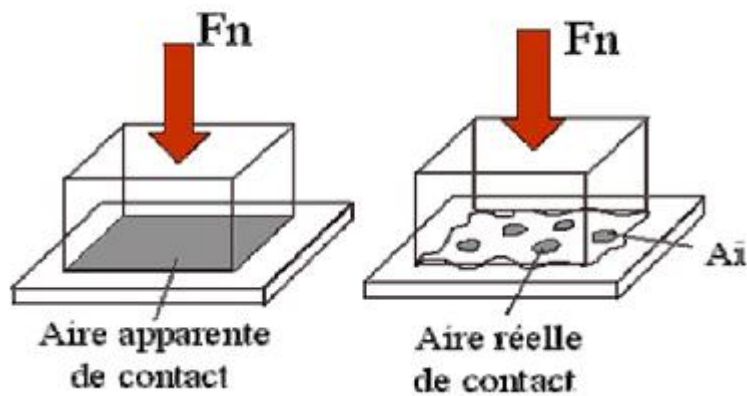


Figure I.10. Aires de contact réel et apparent.

Soit la surface réelle de contact A_r en présence d'une force tangentielle, on a la charge normale: transmise par l'aspérité

$$N = Pr \cdot A_r \tag{I. 3}$$

Pr : Pression de contact

La force de cisaillement du film:

$$T = \tau_f \cdot A_r \tag{I.4}$$

τ_f : Contrainte de cisaillement du matériau le moins résistant .

La force normale peut être liée à la résistance à la pénétration

$$N = A_r \cdot H \tag{I.5}$$

Le coefficient de frottement :

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{\tau_f \cdot Ar}{Ar \cdot H} = \frac{\tau_f}{H} \quad (I.6)$$

I.4.4.5. Frottement de roulement

Ce type de frottement peut être défini lorsqu'un cylindre ou sphère roule sur une surface plane ou moins courbée. On remarque que le frottement de roulement peut être rencontré dans les roulements à billes ou à rouleaux [16].

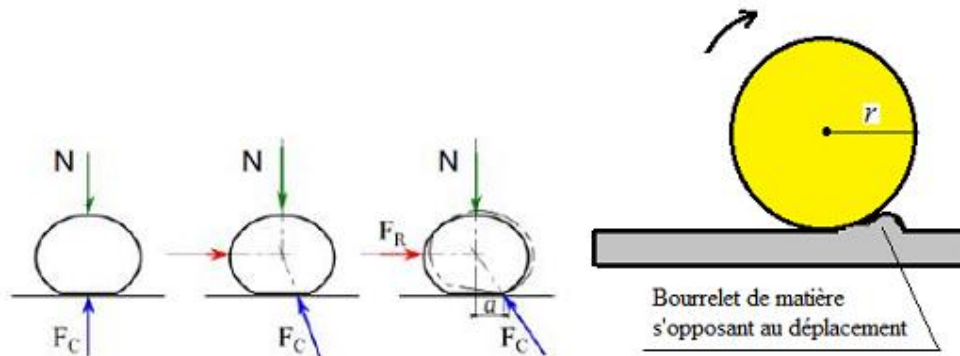


Figure I.11. Frottement de roulement.

On constate que, pour vaincre le frottement de roulement, il est nécessaire de développer moins de force que vaincre le frottement de glissement. Pour faire rouler une sphère, il est nécessaire d'appliquer au centre de cette dernière qui supporte une charge N, une force parallèle au plan sur laquelle repose. La charge N et la force F dépendent l'un de l'autre.

L'aire de contact est montrée sur (la figure I.12.) un micro-glissement se fait au niveau de cette surface.

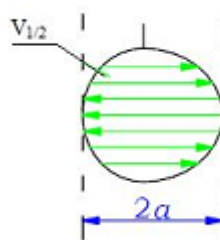


Figure I.12. Aire de contact.

CHAPITRE II

Généralités sur l'usure

II.1. Introduction

L'usure doit être évitée à tout prix dans la plupart des applications d'ingénierie car elle entraîne une perte de fonctionnalité et potentiellement d'énergie, à l'exception de l'usinage, lorsqu'une perte de matière est nécessaire. Les défaillances du système mécanique ou l'usure rapide peuvent également être causées par des débris d'usure [17].

II.2. Définition

L'usure est le résultat du phénomène de frottement qui entraîne l'émission de particules avec un manque de masse, de nervures, de forme, et l'amélioration corporelle et chimique associée des surfaces [18].

L'usure correspond à l'ensemble des phénomènes entraînant une perte de masse ou à des modifications géométriques importantes au sein du contact.

II.3. Mécanismes d'usure

En raison des effets cumulatifs des changements structurels au cours du temps, les processus d'usure sont très proches des processus de frottement, ce qui fausse parfois le parallèle largement visible entre le taux d'usure et le coefficient de frottement. Le problème de la corrosion est plus complexe car la résistance à l'usure d'un matériau est affectée par de nombreux éléments de liaison tels que le matériau, la méthode de chargement et l'environnement.

Il y a trois mécanismes d'usure qui sont considérés, (figure II.1) :

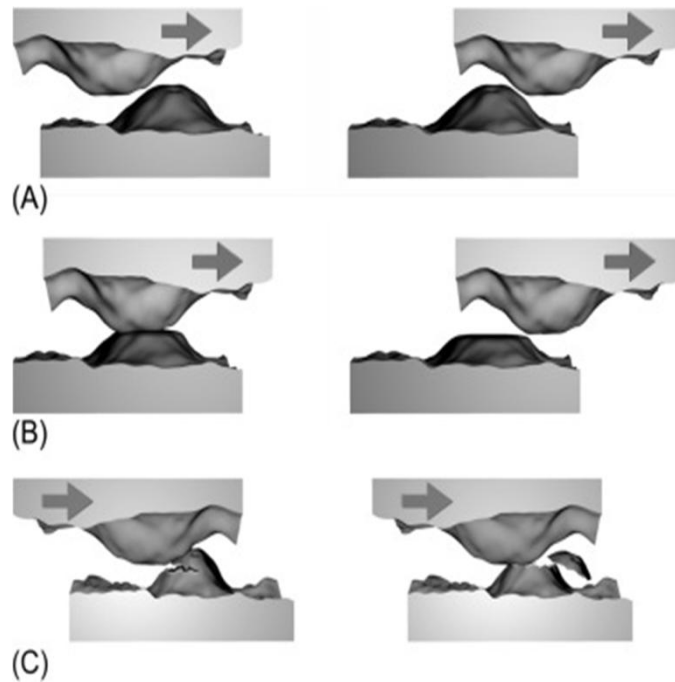


Figure II.1. Mécanismes d'usure : (A) déformation élastique, (B) déformation plastique, (C) cisaillement.

- a) Déformation élastique : après déformation, les protubérances de la surface reprennent leur forme initiale. Ce phénomène peut conduire à la croissance des fissures de fatigue.
- b) Déformation plastique : Les protubérances changent de forme à cause de la concentration locale des contraintes. Des déformations répétées entraînent une accumulation de contraintes et peuvent provoquer d'autres fissures fragiles. La déformation plastique entraîne également le lissage/aplatissement de la surface, ce qui augmente le risque d'usure adhésive.
- c) Cisaillement : elle se produit lorsque la contrainte de cisaillement est suffisamment élevée pour engendrer des ruptures et propager des fissures [19].

II.4. Types d'usure

Il existe plusieurs types d'usure on site les suivants :

- Usure adhésive.
- Usure abrasive.
- Usure corrosive.
- Usure par fatigue [20].

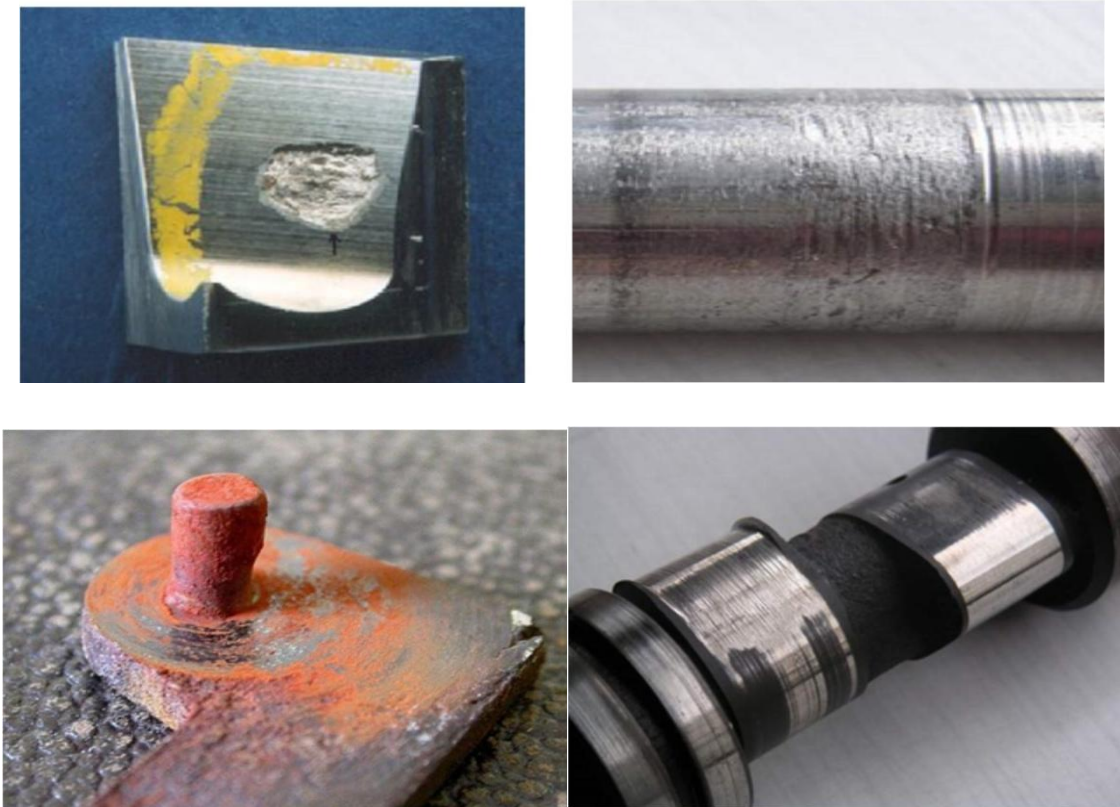


Figure II.2. Exemples des différents types d'usure.

II.4.1. Usure adhésive

L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental [21]. Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique [22], soit suite à une réaction physicochimique. En général l'usure par adhésion se caractérise par deux cas : l'usure douce (soft) et l'usure sévère (hard) :

- **Usure douce** : dans ce cas les débris sont petits, plats, minces. Les particules sont constituées essentiellement d'oxydes (réaction chimique avec le milieu ambiant). Les surfaces de contact restent lisses et polies, une résistance électrique de contact élevée [23].
- **Usure sévère** : dans ce cas les débris sont grossiers, anguleux, nombreux, formé d'un mélange d'oxyde et de matériau de base. Les traces engendrées par frottement sont profondes et les surfaces alors sont rugueuses, une résistance électrique de contact faible [23-24].

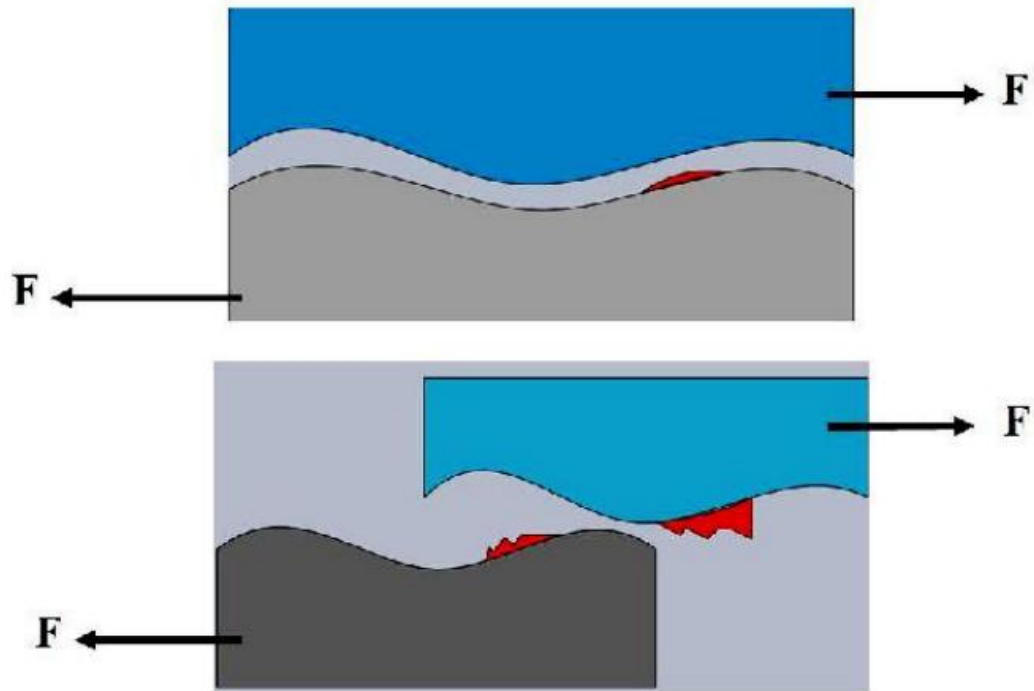


Figure II.3. Usure adhésive.

II.4.2. Usure abrasive

L'usure abrasive est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface de contact d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités ou des particules dures [25]. Selon les quatre modes d'enlèvement de matière suivants :

- Couper.
- Repousser la matière en surface.
- Provoquer une fracture.
- Enlever des grains.

Le plus souvent les deux premiers cas se produisent plus que les deux derniers.

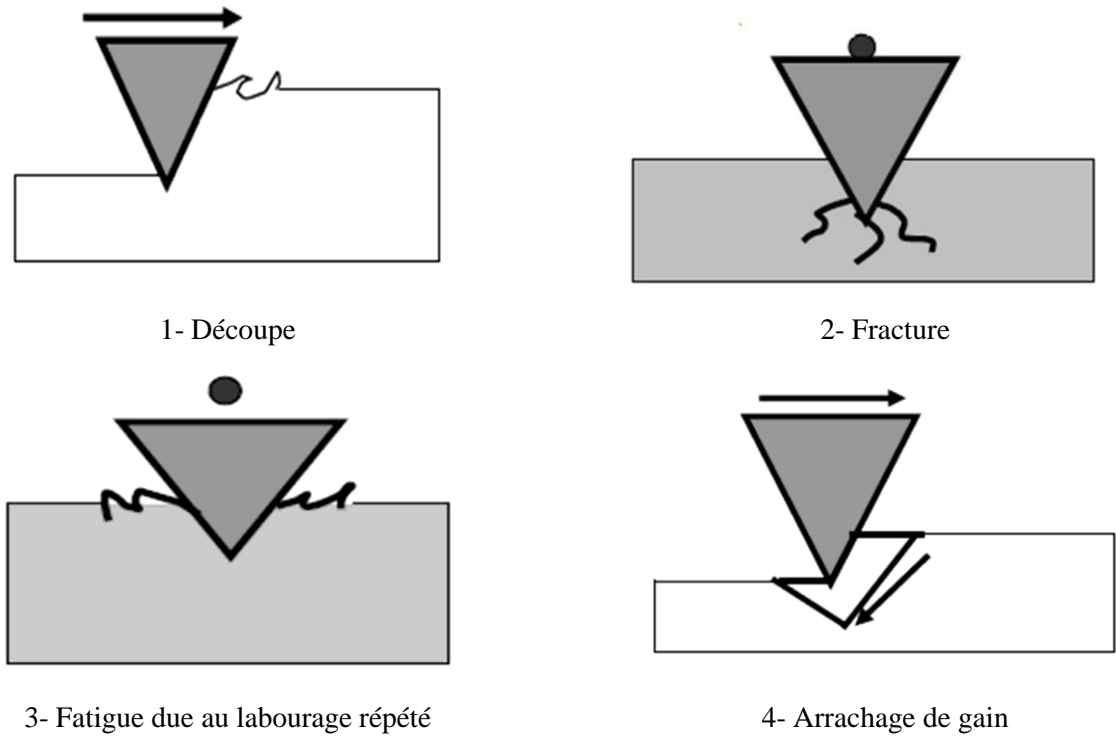


Figure II.4. Les quatre modes d'usure abrasive.



Figure II.5. Usure abrasive.

II.4.3. Usure corrosive

On appelle corrosion la réaction d'un matériau métallique avec son environnement, qui produit une altération mesurable du matériau. Elle se produit dans un environnement corrosif, l'oxygène de l'environnement normal ou d'autres gaz présents dans l'environnement peuvent réagir avec la surface solide [26].

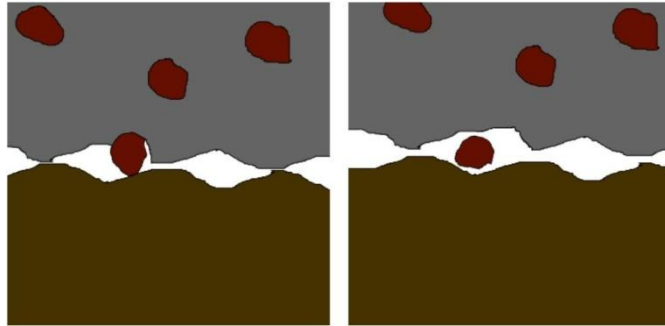


Figure II.6. Etat de surface après une usure corrosive.

II.4.4. Usure par fatigue

Cette usure est due à des charges cycliques. Il en résulte une série de fissures, cette dernière est observée sur la surface. Elles se propagent, se raccordent à d'autres fissures et génèrent des particules d'usure. La propagation des fissures est influencée par un certain nombre de facteurs ; le plus important d'entre eux est l'humidité relative de l'air. La croissance des fissures se produit rapidement dans un environnement très humide plutôt que dans l'air sec [27].

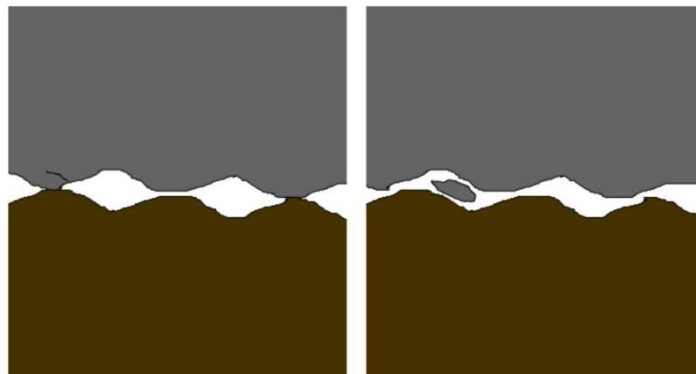


Figure II.7. Usure par fatigue.

II.5. Facteurs d'usure

II.5.1 Mode de contact

On distingue trois principaux modes de contact :

- Contact ponctuel, par exemple : sphère sur plan.
- Contact linéaire (par exemple : cylindre sur un plan).
- Contact surfacique (par exemple : plan sur plan).

II.5.2. Etat des surface

Les pièces usinées présentent par rapport à leur forme idéale, des défauts géométriques. L'une des conséquences de l'existence de ces défauts géométriques est que l'aire réelle de contact n'est souvent qu'une faible fraction de l'aire apparente de contact.

II.5.3. Charge

Une charge normale appliquée à un solide en mouvement avec l'autre entraîne une perte de masse.

II.5.4. Vitesse

Ces vitesses peuvent être glissantes, roulantes ou pivotantes, selon la situation. Considérez le glissement sec, qui affecte principalement la température de surface des objets en contact.

II.5.5. Environnement

Cette phrase fait référence à la composition du milieu ainsi qu'aux conditions de pression et de température entourant les pièces dans la zone de contact, y compris la lubrification.

II.5.6. Nature des matériaux

Bien que les qualités de frottement ne soient pas inhérentes aux matériaux, elles peuvent avoir un impact significatif sur le comportement du système en raison de leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques.

II.6. Les effets d'usure

- Altération dimensionnelle des pièces.
- Augmentation des jeux de fonctionnement.
- Dégradation des caractéristiques superficielles.

II.7. Mesure de l'usure

Un test de frottement sur un manomètre est couramment utilisé pour déterminer l'étendue de l'usure.

La quantité de matière perdue peut être mesurée à l'aide de simples procédures de mesure d'usure:

- Pesée : pesée de l'échantillon avant et après le test de frottement au moyen d'une balance de précision.

- Mesure de cote : Mesure de la variation de longueur d'un échantillon avant et après le test de frottement, dans le cas d'une usure uniformément répartie.
- Mesure du volume usé : Mesure de topographie avant et après test pour évaluer le volume enlevé pour créer la piste d'usure.

II.8. Les solutions pour lutter contre l'usure

Lorsque les machines tournent à plein régime, l'usure de l'outil augmente. Le moyen le plus simple de prolonger la durée de vie des pièces de la machine est de remplacer régulièrement les outils usés. Cependant, les dépenses sont élevées et il existe des options alternatives moins coûteuses à considérer.

Il est essentiel d'améliorer la conception des pièces de machine avec des matériaux, des traitements thermiques et/ou des traitements de surface appropriés. Ceux-ci modifient les propriétés physiques et chimiques du matériau. Il a la propriété unique d'augmenter la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à l'oxydation à chaud, le coefficient de frottement et d'autres propriétés du matériau trait...

Chapitre III

Mécanismes d'usure et relations
dureté - usure abrasive

III.1. Introduction

L'usure abrasive représente le grand pourcentage d'usures des pièces endommagée dans le domaine industriel c'est ce qui a fait des plusieurs chercheurs au début des années cinquante faite des recherches et expérience pour détecter et essayé de lutter le problème en termes d'estimation, de prévention de dégradation et de contrôle.

A cause des différents problèmes industriels l'usure abrasive a connu des développements rapides en termes de testes [28.29.30]. Avec le niveau auquel ce développement rapide atteint, les mécanismes d'usure restent toujours difficiles à détecter et modéliser. Au même temps, une meilleure compréhension des mécanismes d'usure à différentes niveau (macroscopiques et microscopiques) est en cours de création. Nouvellement, les chercheurs faite des grands efforts et des travaux afin de comprendre l'objet de la relation entre usure abrasive, microstructure, et propriétés mécaniques. Jusqu'à ce moment les chercheurs attient des résultats sont souvent spécifiques à une configuration et à des conditions de sollicitations particulières.

III.2. Usure abrasive

L'agent principal de ce phénomène est le contact entre les aspérités des deux surfaces Cette usure correspond au déplacement ou à enlèvement de matière par celles-ci.

Cet enlèvement se produit soit lorsque l'un des matériaux est plus dur soit lorsque des particules dures et de formes anguleuses introduites intentionnellement (polissage) ou formées par réaction chimique à partir des débris d'usure (tribo-chimie) se trouvent entre les surfaces de glissement .Il se produit alors un déplacement de matière dû aux parties dures et la dégradation de surface se manifeste par polissage, des griffures ou des sillons accompagnés ou non d'émission de fins débris, copeaux ou écailles [31].

L'abrasion est un phénomène de dégradation superficielle se rapportant aussi bien l'outil que le produit de mise en forme la dureté et le taux de consolidation de la structure par écrouissage sont des facteurs importants qui limitent l'usure abrasive sous réserve que les matériaux conserve une capacité de déformation plastique sans excès de fragilité. [32].

III.3. Types d'usure abrasive

L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps, on distingue :

- L'usure abrasive à deux corps
- L'usure abrasive à trois corps ouverts
- L'usure abrasive à trois corps fermés

III.3.1. Usure abrasive à deux corps

Ce type d'usure est une opération d'usure par translation et/ou enlèvement de matière de la surface frottant d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures fixes [33]. Le rayage se fait par aspérité de la surface la plus dure sur la surface la moins dure et plus tendre.

L'abrasion à deux corps a une relation avec quelques sections qui consomment grand d'énergie et de matières ou encore les procédés d'enlèvement de matière volontaire, que l'on veut connaître et maîtrisée. Afin de ces raisons alliées à une mise en œuvre une modélisation mathématique très simple, d'abrasion à deux corps est la cause des plusieurs problèmes ce qui en a fait l'objet des recherches nombreuses et approfondies. Elle est célèbre par ses aspects négatifs. Elle présente toutefois un aspect positif recherché dans de nombreux procédés d'usinage (machine à outil, polissage).

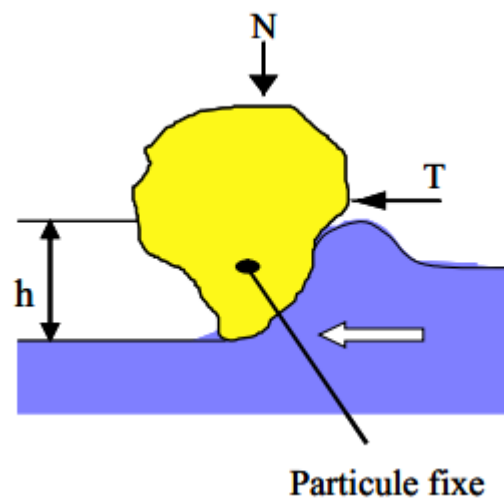


Figure III.1. Abrasion à deux corps.

III.3.2. Abrasion à trois corps fermée

Ce type d'abrasion c'est le résultat du frottement de deux surfaces avec la présence d'abrasifs libres (Figure III.2.). Dans les configurations d'abrasion à trois corps, il faut distinguer deux cas :

- la distance entre les surfaces est du même ordre de grandeur que la dimension des grains abrasifs ($D \leq D_{\text{max grain}}$),
- la distance entre les surfaces est supérieure à la dimension des grains ($D > D_{\text{max grain}}$).

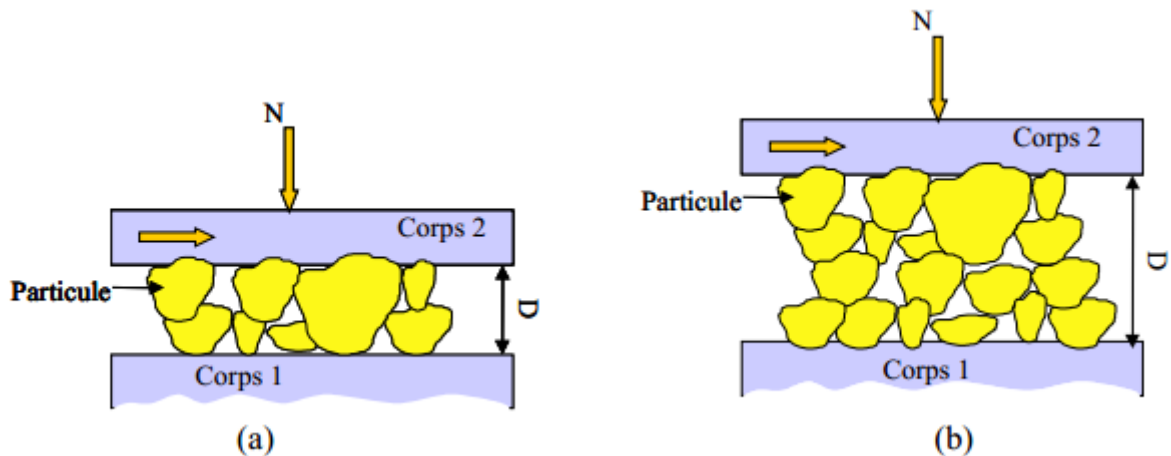


Figure III.2. Abrasion à trois corps fermée : (a) $D < D_{max}$ grainet (b) $D > D_{max}$ grain.

Dans le premier cas $D \leq D_{max}$ grain, les deux surfaces sont également exposées à l'abrasion et le comportement de chaque surface réagit sur l'autre. L'incrustation de particules dures dans une surface tendre ou leur imbrication dans une surface dure écaillée peut transformer le processus en une abrasion à deux corps. Le phénomène de broyage peut être aussi observé avec ses effets secondaires sur la sollicitation : élimination des arêtes vives, ou au contraire, formation de nouvelles arêtes actives selon la sollicitation et le mode de fragmentation du grain. Dans cette configuration les deux surfaces subissent immédiatement les chocs éventuels qui peuvent les détériorer de façon importante si le granulat est dur et peu fragile.

Dans le second cas où $D > D_{max}$ grain, les propriétés mécaniques d'une surface n'ont plus d'incidence directe sur l'autre, l'abrasion ne peut être localisée que sur une seule des surfaces. Le comportement rhéologique du corps à l'interface devient alors prépondérant.

III.3.3. Abrasion à trois corps ouverte

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, si une seule surface intervient dans le processus de frottement, on parle d'usure abrasive à trois corps ouverte (Figure III.3.). Ce type de configuration est souvent rencontré dans le cas de matériaux granulaires en contact avec un solide.

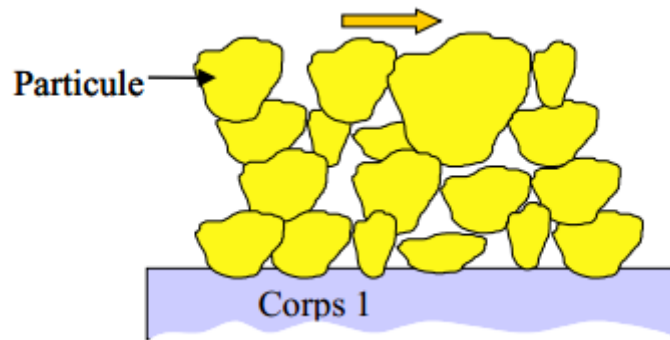


Figure III.3. Abrasion à trois corps ouvert.

Les configurations mentionnées supposent toutes la présence de corps abrasifs. Il faut noter, que la présence de ces corps abrasifs peut être accidentelle, le plus souvent il s'agit de poussières. En revanche, certaines sollicitations de contact, initialement exemptes de particules abrasives, peuvent elles-mêmes les générer par oxydation des débris. Les contacts réels sont généralement plus complexes et la coexistence de l'abrasion à deux et trois corps est souvent rencontrée. C'est suivant les mouvements relatifs des particules abrasives qu'on peut avoir soit une abrasion à deux corps, soit une usure abrasive à trois corps.

Si les particules glissent sans rotation par rapport à la surface alors on parle d'usure abrasive à trois corps. Si les particules ont des mouvements de rotation par rapport à la surface, alors on parle d'usure abrasive à trois corps. Les mouvements relatifs des particules abrasives dépendent à la fois de leur géométrie, de leurs propriétés mécaniques, des conditions de sollicitation et des propriétés des interfaces [34].

III.4. Paramètres caractéristiques de l'usure abrasive

En plus de la configuration mécanique du contact, l'usure abrasive dépend de plusieurs paramètres de sollicitation. L'identification et les critères de l'usure abrasive sont basés sur :

- les paramètres de sollicitation : fortes ou faibles contraintes.
- les caractéristiques du milieu : corps abrasif et ambiance.

III.4.1. Paramètres de sollicitation

La sollicitation d'un contact est caractérisée par la pression de contact et la vitesse de glissement relative surfaces / granulat abrasif.

On considère les trois grandes classes suivantes de sollicitations :

- Abrasion sous très fortes sollicitations : fortes à très fortes contraintes et très fortes concentrations de contraintes, avec chocs éventuels d'intensité élevée. Cette sollicitation est aussi appelée abrasion au gougeage,
- Abrasion sous fortes sollicitations : fortes contraintes et fortes concentrations de contraintes, chocs éventuels d'intensité limitée. Cette classe est souvent désignée par abrasion au meulage,
- Abrasion sous faibles sollicitations : faibles contraintes et faibles concentration de contraintes, chocs éventuels accidentels.

III.4.2. Paramètres du processus d'abrasion

Les acteurs des processus d'abrasion sont essentiellement :

- le corps abrasif : l'usure abrasive dépend fortement de la dureté, de la géométrie, de la résistance à l'usure et du mode de fragmentation des abrasifs. En effet, la dureté est importante puisqu'elle détermine l'aptitude physique du grain à rayer un matériau plus tendre. En revanche, la forme du grain a une influence évidente sur son agressivité en combinaison avec sa dureté. Mais également sa résistance à la rupture qui pourra favoriser l'arrondissement du grain ou au contraire la création de nouvelles arêtes vives selon le mode de fragmentation.
- l'environnement : l'environnement comprend essentiellement l'humidité et la corrosivité du milieu. Les effets de l'humidité sont négligeables dès que la vitesse d'usure est importante et concerne un volume du matériau supérieur à celui qui est susceptible d'être modifié par une oxydation ou un échauffement superficiel. En revanche, si l'intensité de l'usure est faible (abrasion sous faibles charges ou avec des grains fins ou sphériques), les propriétés du milieu et de la couche superficielle sont très influentes. En milieu chimiquement très agressif, la corrosion peut se superposer à l'abrasion, dont les effets de coupe sont susceptibles de détruire la couche passive éventuelle, la vitesse d'usure dépend alors de la rapidité de passivation du métal dans le milieu et de l'intensité d'abrasion [35].
- La température : la température peut influencer la résistance à l'usure abrasive et suivant ses effets une diminution ou augmentation de la résistance. Une température élevée favorisera l'oxydation ou la corrosion, dans certains cas une couche d'oxyde bien adhérente au métal de base peut le protéger de l'abrasion. Un certain nombre d'aciers réfractaires montrent une bonne résistance combinée à l'abrasion corrosion et leur domaine d'utilisation en température.

III.5. Essais d'abrasion

Les besoins spécifiques à vocation professionnelle, ont permis de développer divers moyens d'essais d'abrasion. La gamme des sollicitations et la possibilité de les faire varier de façon contrôlée permettent d'envisager la caractérisation de matériaux en vue de leur choix optimal pour diverses applications industrielles.

Ces moyens peuvent être mis en œuvre dans une optique conventionnelle de caractérisation du matériau, ou dans une optique de simulation, visant le choix des matériaux pour un usage donné. Les essais de type conventionnel permettent d'apprécier et de comparer les caractéristiques d'élaboration du matériau (composition, structure, dureté, ...), en mettant l'accent sur un ou plusieurs des paramètres d'abrasion (nature des abrasifs, vitesse, charge...).

La diversité et la complexité des problèmes industriels mènent à une large gamme de types d'essais abrasifs. L'annexe 3 présente les essais d'abrasion les plus réputés. Le choix du test s'effectue généralement après une étude de la situation réelle. Le diagnostic de l'endommagement réel et l'étude économique de l'application permettent de choisir le test convenable[34].

III.6. Mécanismes d'usure abrasive

Les développements des différents moyens d'observation à différentes échelles offrent une opportunité au niveau des analyses tribologiques. L'identification des mécanismes d'usure est considérée comme étant la phase la plus importante pour analyser les dégradations en abrasion. Les analyses quantitatives des systèmes endommagés en service sont souvent compliquées et une étude qualitative sera prioritaire. Une étude qualitative à différentes échelles permet de déterminer les différents modes d'usure afin de trouver le scénario complet d'endommagement.

III.7. Effet du glissement répétitif

III.7.1. Glissement mono passe

Comme nous l'avons déjà vu, les études de l'usure abrasive à un seul passage ont montré qu'il y avait trois modes d'usure : coupe (cutting), formation de bourrelets (wedge) et labourage (ploughing). Ces mécanismes dépendent de la configuration du test, des conditions de frottement. Kato a introduit le « degré de pénétration » [36] :

$$D_{P=\frac{h}{a}} = \left(\frac{\pi H}{2F_N}\right)^{1/2} - \left(\frac{\pi R^2}{2F_N} H - 1\right)^{1/2} \quad (\text{III.1})$$

a : rayon de contact ; h : profondeur de pénétration ; R : rayon de l'aspérité ; H : dureté de la surface ; FN: masse.

Lors de la formation d'une rayure, de la matière est déformée plastiquement pour former des bourrelets. C'est pour cette raison que la profondeur apparente de la rayure ne permet pas de connaître le volume moyen déplacé. Donc l'usure réelle est difficile à quantifier. Plusieurs auteurs ont introduit le terme degré d'usure comme le rapport entre le volume de matière enlevé et le volume déformé. Le degré d'usure est défini par : (Figure III.4.).

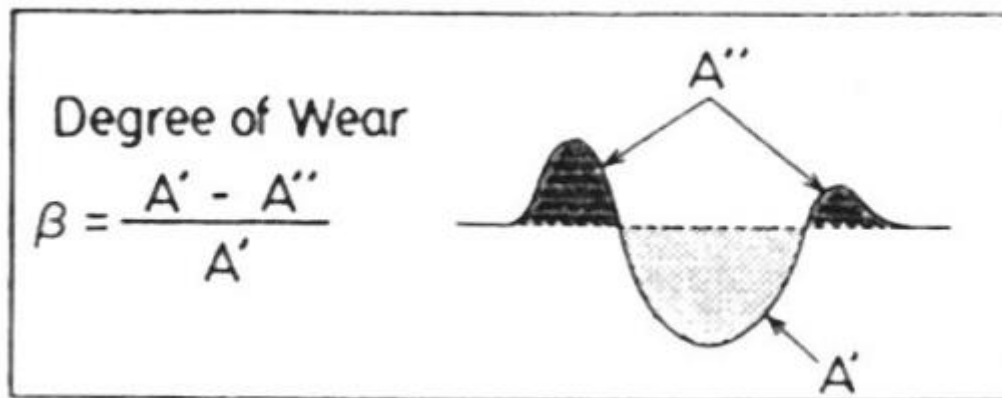


Figure III.4. Définition du degré d'usure selon Kato.

Une relation entre β et D_p a été établie par Hokkirigawa [37] (Figure III.5.). La valeur de β croît avec D_p et atteint par la suite une valeur constante. La forme des courbes dépend des propriétés de déformation du matériau et décroît avec la dureté (Figure III.5.). Une faible valeur de β correspond à un mode de labourage. En revanche, une valeur élevée correspond à un mécanisme de coupe. On obtient :

$$\beta = cD_p^l \quad (\text{III.2})$$

Où c et l sont des constantes expérimentales.

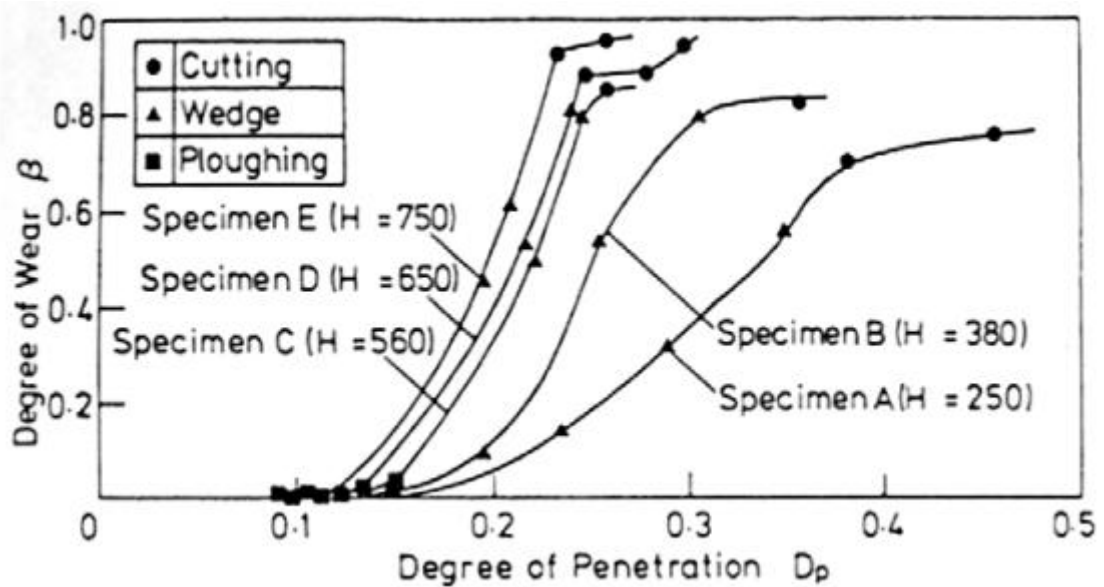


Figure III.5. Degré d'usure en fonction du degré de pénétration.

Dans les conditions de sollicitation réelles, l'usure est engendrée par des phénomènes répétitifs. Donc il apparaît plus intéressant d'étudier le glissement répétitif et son influence sur les mécanismes d'usure.

III.7.2. Glissement multi-passe

Kato [38] a étudié l'effet du glissement répétitif sur les mécanismes d'usure abrasive en utilisant une configuration pion / disque. Le suivi (in situ) des processus d'usure abrasive montre qu'on peut aboutir à un changement de mécanismes d'usure avec le nombre de cycles. Les résultats présentés sur la figure (Figure III.6.) montrent les mécanismes d'usure en fonction du nombre de cycles pour différents efforts normaux. Un effort normal de 1.5N montre une transition rapide des modes d'usure (coupe, formation de bourrelets, formation de languettes et labourage) en augmentant uniquement le nombre de cycles de glissement.

Les transitions des modes d'usure sont fortement liées au changement des propriétés de la surface après sollicitation.

Kato [38] a établi une relation entre les modes d'usure et le degré de pénétration. D_{pN} qui est l'augmentation de la profondeur de pénétration divisé par la longueur du contact dans le sens du glissement au nième passage est obtenu par la relation :

$$D_{pN} = \frac{R}{(W_N^2 - W_{N-1}^2)^{1/2}} - \left(\frac{R^2}{W_N^2 - W_{N-1}^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (III.3)$$

Avec R : rayon de l'aspérité

W_N : demi rayon de contact pour le nième cycle

W_{N-1} : demi rayon de contact pour le (n-1) ième cycle

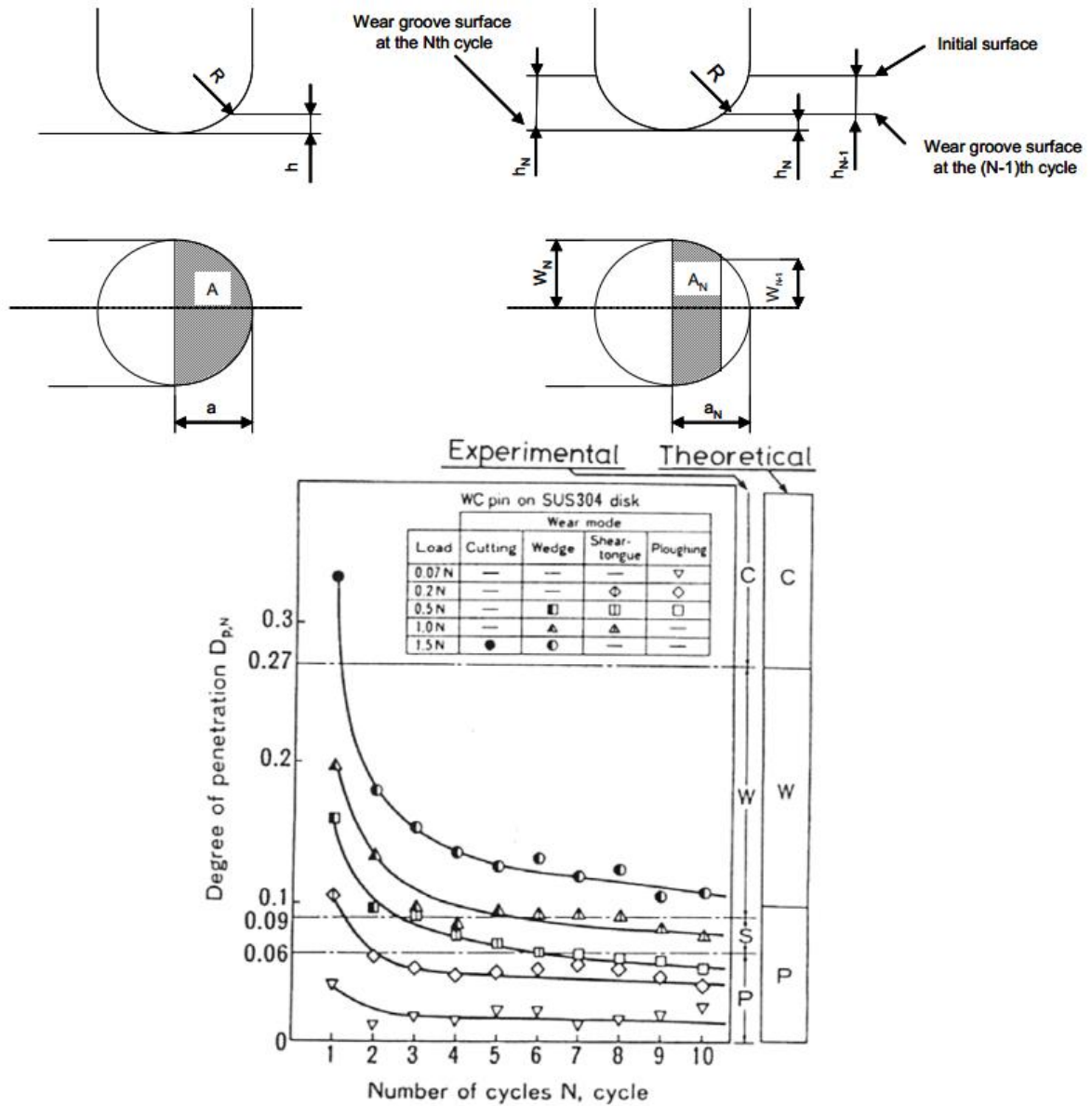


Figure III.6. Transitions des modes d'usure dans le cas de glissement répétitif.

III.8. Modélisation de l'essai de rayage

III.8.1. Description de l'essai de rayure

Un indenteur (pyramide, sphère, cône) généralement en diamant, se déplace à une vitesse constante sur un matériau, selon une direction parallèle à la surface de l'échantillon. On impose généralement une force normale constante durant l'essai.

III.8.2. Les paramètres mécaniques imposés

a) Déformation

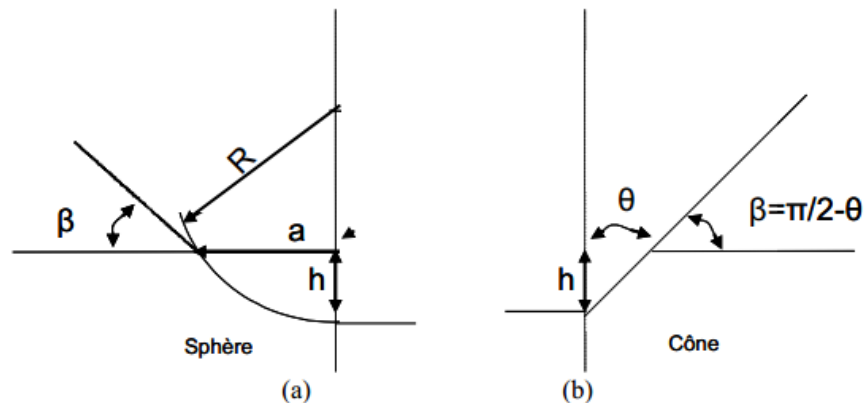


Figure III.7. Paramètres géométriques pour un indenteur : (a)sphérique (b)conique [39].

Le niveau de déformation au cours de l'essai de rayure est imposé par la géométrie de l'indenteur (Figure III.7.). Lors de l'indentation normale d'une surface par un indenteur axisymétrique, la déformation moyenne ε_i imposée par l'indenteur est :

$$\varepsilon_i \approx k \frac{h}{a} \quad (\text{III.4})$$

k : facteur numérique, h : pénétration de l'indenteur , a : rayon de contact

Pour des indenteurs sphériques et pour des rayons de contact faibles devant le rayon de la sphère, Tabor [40] estime la déformation moyenne par :

$$\varepsilon_i \approx 0.2 \frac{h}{a} \quad (\text{III.5})$$

Johnson [41] propose par analogie avec les travaux de Tabor [38] une valeur de la déformation moyenne pour des indenteurs coniques (cônes de révolution ou pyramides) et pour des angles β faibles :

$$\varepsilon_i = 0.2 \tan \beta \quad (\text{III.6})$$

soit $k=0.2$

Dans le cas d'un cône ou d'une pyramide, le niveau de déformation est indépendant de la pénétration, alors que pour une sphère celui-ci augmente avec la pénétration de l'indenteur. Briscoe et al [42] étendent la définition de l'équation précédente à l'essai de rayure, pour des cônes. A partir de la démarche proposée par Atkinset Tabor [43] et des travaux de rayage sur des métaux de

Brookes et al [44], Felder [45] estime que le niveau de déformation en rayage, pour les métaux est cinq fois plus important que celui en indentation, donc :

$$\varepsilon_s \approx 1.5 \frac{h}{a} \quad (\text{III.7})$$

soit $k=1.5$

Brookes et al [44] observent que dès que $\theta = 52.5^\circ$, la déformation induite en rayure sur des métaux devient comparable à celle induite dans une opération de coupe ; les bourrelets observés en indentation dégénèrent en copeau lors de la rayure. Selon Felder [45], ce changement dans le mode de déformation traduit une augmentation du niveau de déformation lors du passage de l'indenteur à la rayure.

b) Vitesse de déformation

La vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}_s$ est estimée par Briscoe et al [42], comme étant le rapport de la vitesse de rayage v et de la largeur de la trace b :

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{v}{b} \quad (\text{III.8})$$

Donc la vitesse de déformation dépend de la vitesse de l'indenteur et de la largeur de la trace et sous-entendu de l'effort normal. La vitesse de déformation moyenne, pour des indenteurs coniques est fonction de l'effort normal, mais aussi du rayon de courbure pour des indenteurs sphériques.

III.8.3. Grandeurs mesurées

Dureté de rayage : on définit la dureté de rayage comme étant le rapport entre l'effort normal et l'aire de la projection de la surface de contact indenteur / matériau, pour un indenteur conique :

$$H_s = \frac{8W}{\pi b^2} \quad (\text{III.9})$$

Avec W : effort normal, b : demi-largeur de la trace

Cette dureté représente une première estimation de la pression moyenne de contact, dans le cas où le frottement à l'interface est très faible devant les pressions de contact, ou lorsque la cession de contact est parallèle à la surface de l'échantillon. Cette expression de la dureté repose sur les hypothèses suivantes : le contact matériau / indenteur n'a lieu que sur la partie avant de l'indenteur ; la largeur de rayure est la même après le passage de l'indenteur que sous charge ; la hauteur du bourrelet est uniforme sur tout le pourtour du contact. Les deux premières hypothèses sont sujettes à caution lorsque le retour élastique du matériau est important.

Plusieurs auteurs ont précisé la part de l'élasticité lors de l'indentation grâce à l'indice d'indentation X . Ce nombre est défini comme le rapport entre la déformation imposée par l'indenteur et la partie élastique de la déformation dans le matériau, pour un cône :

$$X = \frac{E}{\sigma_0} \cot \theta \quad (\text{III.10})$$

Si X est proche de 1, le retour élastique après indentation est très marqué. Si X est supérieur à 100, la déformation est essentiellement plastique.

III.8.4. Calcul du coefficient de frottement apparent et local – modèles analytiques

Le coefficient de frottement apparent dans un essai de rayage est le rapport entre l'effort tangentiel et l'effort normal. En littérature, plusieurs modèles analytiques ont été développés. Ces modèles considèrent généralement des configurations simples (bille / plan, cône / plan...). En rayage, la force tangentielle est classiquement décomposée en une force adhésive F_a induite par le frottement à l'interface, et une force de labourage F_p induite par la déformation plastique du matériau. On distingue ainsi plusieurs modèles [46.47.48]. En effet, en 1966 Bowden et Tabor ont développé un modèle de rayage permettant de calculer le coefficient de frottement apparent à partir de la géométrie de l'indenteur (angle d'attaque). Ce modèle néglige la composante adhésive entre indenteur / matériau. Plus récemment, d'autres travaux de recherches ont introduit la composante adhésive. Ce modèle permet d'estimer le coefficient de frottement inter facial entre indenteur / matériau.

Chapitre IV

Modélisation de l'essai d'usure abrasive

IV.1. Introduction

Des nombreux modèles du phénomène d'abrasion ou de rayage restent toujours simples et limités malgré le développement qui a connu ce phénomène dans la littérature à cause de la coexistence de plusieurs paramètres gouvernant l'usure abrasive.

En réalité, il existe deux différentes catégories de modélisation. La première consiste à utiliser des méthodes numériques permettant de modéliser plusieurs paramètres d'usure. Cette dernière nécessite souvent l'emploi de codes de calcul lourds. La seconde catégorie s'appuie sur des formules empiriques qui sont généralement spécifiques à une configuration et des conditions d'essai bien définis (configuration bille / plan ou cône / plan).

En rayage, la modélisation des paramètres d'usure est généralement réalisée en considérant des géométries simples. En effet, le lien entre ces modèles et la réalité reste limité car ces particules abrasives ont des formes plus complexes.

IV.2. Calcul de la section de rayure

On distingue deux cas :

- le premier où la profondeur de pénétration h est inférieure à $R(1-\cos\theta)$ ($h \leq R(1-\cos\theta)$),
- le deuxième où la profondeur de pénétration h est supérieure à $R(1-\cos\theta)$ ($h > R(1-\cos\theta)$),

Dans chacun des cas précédents, on calcule la section de la rayure pour une profondeur de Pénétration h donnée. Le calcul s'effectue par intégration à partir de la géométrie de la trace d'usure.

IV.2.1. Rayage avec le bout sphérique et une partie du cône ($h > R(1-\cos\theta)$)

Dans cette configuration, la rayure est générée par la partie sphérique et par une partie de la partie conique. La section transversale de la trace d'usure A_c^p s'écrit alors :

$$A_c^p = \frac{R^2}{2 \sin \theta} \left[2\theta \sin \theta + 2 \frac{h}{R} - 2 + 3 \cos \theta - \cos^3 \theta + \left(\frac{h}{R} \right)^2 \cos \theta - 2 \frac{h}{R} \cos \theta - \sin 2\theta \sin \theta \right] \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.2. Rayage avec le bout sphérique ($h \leq R(1-\cos\theta)$)

La section transversale d'une trace de la rayure est obtenue par intégration de la surface élémentaire d'une calotte sphérique projetée selon la direction de glissement. Pour une profondeur de pénétration donnée la section de rayure A_s^p est donnée par :

$$A_s^p = \frac{1}{2} R^2 \left\{ 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{h}{R} \right) - \sin \left[2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{h}{R} \right) \right] \right\} \quad (\text{IV.2})$$

La configuration est analogue à une configuration bille/plan et la rayure est générée par le bout sphérique.

IV.3. Calcul de l'effort normal et tangentiel

Afin de attient les calculs normale et tangentiel, nous traitons aussi les deux cas précédent

IV.3.1. Rayage avec le bout sphérique ($h \leq R(1-\cos\theta)$)

Soit dPs et dQs les deux efforts normal et tangentiel appliqués sur une unité de surface dAs de la partie hémisphérique.

$$dPs = p \cos \alpha \, dAs, \quad 0 \leq \alpha \leq \cos^{-1} \left(1 - \frac{h}{R} \right) \quad dAs = R^2 \sin \alpha \, d\alpha \, d\varphi$$

$$dQs = p \left(\sin \alpha \cos \varphi + \frac{\tau}{p} \sin \varphi \right) dAs, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (IV.3)$$

Où :

P : la pression normale.

τ : la pression tangentielle à l'interface.

Ps : Les efforts normal.

Qs : Les efforts tangentiels.

Sont obtenus en intégrant les deux expressions précédentes.

$$Ps = 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\cos^{-1}(1-h/R)} p R^2 \cos \alpha \sin \alpha \, d\alpha \, d\varphi = \frac{\tau}{2} p R^2 \left[1 - \left(1 - \frac{h}{R} \right)^2 \right] \quad (IV.4)$$

$$Qs = Ps = 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\cos^{-1}(1-h/R)} p R^2 \left(\sin \alpha \cos \varphi + \frac{\tau}{p} \sin \varphi \right) \sin \alpha \, d\alpha \, d\varphi$$

$$= p R^2 \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{h}{R} \right) - \left(1 - \frac{h}{R} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{h}{R} \right)^2 \right]^{1/2} + 2 \left(\frac{\pi}{p} \right) \left(\frac{h}{R} \right) \right\}$$

Les efforts sont exprimés en fonction des contraintes de contact (p et τ), du rayon R et de la profondeur h .

IV.3.2. Rayage avec le bout sphérique et une partie du cône ($h > R(1-\cos\theta)$)

Les forces appliquées par la partie hémisphérique se calculent pour $\alpha = \theta$.

On aura :

$$P_s = \frac{\pi}{2} p R^2 \sin^2 \theta \quad (IV.5)$$

$$Q_s = p R^2 \left[\theta - \sin \theta \cos \theta + 2 \left(\frac{\tau}{p} \right) (1 - \cos \theta) \right]$$

Les forces appliquées par la partie conique se calculent en substituant α par θ dans l'équation (IV.3) et en écrivant : $dA_s = r(1/\cos \theta) dr d\varphi$ où $R \sin \theta \leq r \leq a/2$

Les forces sont alors égales à :

$$P_c = 2 \int_0^{\pi/2} \int_{R \sin \theta}^{R[(h/R)-1+(1/\cos \theta)] \cot \theta} p R \cos \theta \sin \theta r dr d\varphi$$

$$P_c = \frac{\pi}{2} p R^2 \left\{ \left[\left(\frac{h}{R} - 1 + (1/\cos \theta) \right) \cot \theta \right]^2 - \sin^2 \theta \right\}$$

$$Q_c = 2 \int_0^{\pi/2} \int_{R \sin \theta}^{R[(h/R)-1+(1/\cos \theta)] \cot \theta} p \left(\sin \theta \cos \varphi + \frac{\tau}{\pi} \sin \varphi \right) (1/\cos \theta) r dr d\varphi$$

$$Q_c = p R^2 \left[\tan \theta + \left(\frac{\tau}{p} \right) (1/\cos \theta) \right] \left\{ \left[\left(\frac{h}{R} - 1 + (1/\cos \theta) \right) \cot \theta \right]^2 - \sin^2 \theta \right\} \quad (IV.6)$$

Les efforts normal et tangentiel total seront la somme de deux composantes appliquées à la fois sur la partie sphérique et conique de l'indenteur.

$$\begin{cases} P = P_s + P_c \\ Q = Q_s + Q_c \end{cases} \quad (IV.7)$$

On peut calculer les efforts normal et tangentiel pour les deux cas (rayage qu'avec le bout sphérique ou rayage avec la partie sphérique et une partie conique) par l'utilisation des deux précédentes équations (IV.4) et (IV.7). Les paramètres d'entrée sont l'angle d'attaque θ , le rayon du bout sphérique R , la profondeur de pénétration h et les deux pressions de contact interfaciale p et τ .

IV.4. Les modèles de calcul du coefficient de frottement

On peut définir le coefficient de frottement comme le rapport entre l'effort normal et tangentiel. Nous supposons ici que l'effort tangentiel se décompose en une force adhésive qui représente le frottement local entre l'indenteur et le matériau, et une force de labourage induite par la déformation plastique.

IV.4.1. Modèle de Bowden et Tabor

Le modèle de Bowden et Tabor se base sur la décomposition de l'effort tangentiel en deux parties:

- la première est F_p correspond à la déformation du matériau et provoque l'usure par déformation plastique formant des copeaux ou / et des bourrelets.
- une deuxième partie F_a correspond à l'énergie d'adhésion dans l'interface indenteur / matériau.

Alors la formule de l'effort est : $F_t = F_p + F_a$

Les précédents composantes dépendent de la géométrie de l'indenteur, des propriétés du matériau testé et des conditions de sollicitation notamment la pression de contact.

En 1966, d'après les recherches de Bowden et Tabor ils ont amélioré un modèle permettant de calculer le coefficient de frottement apparent, en négligeant la composante adhésive entre indenteur et matériau.

Après cette hypothèse la formule devient écrit comme suivant : $F_t = F_p$

Le coefficient de frottement apparent s'écrit alors :

$$\mu_0 = \frac{F_t}{W} = \frac{F_p}{W}, \quad W : \text{effort normal}$$

Par la négligence de la composante adhésive (contact lubrifié) par rapport à la composante de labourage et on exprime les forces en terme des pressions d'écoulement on aura :

$$F_p = H_p \cdot A_p$$

$$W = H_s \cdot A_s$$

Avec :

H_p : la dureté de labourage.

H_s : la dureté de rayage.

$$\text{Donc } \mu_0 = \frac{A_p H_p}{A_s H_s} \quad \text{pour } H_p = H_s \text{ cela conduit à}$$

$$\mu_0 = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cot \theta \quad (\text{Bowden et Tabor [46]})$$

A partir de négligence de l'effort adhésif entre l'indenteur et le matériau pour un indenteur conique, avec Le seul paramètre d'entrée est le demi angle au sommet de l'indenteur θ . Ce modèle permet de calculer le coefficient de frottement apparent.

IV.4.2. Modèle (Bowden et Tabor amélioré)

Nouvellement, l'énergie d'adhésion elle n'est plus négligée aux point de vue des plusieurs chercheurs. Ils ont essayé d'intégrer son effet dans la modélisation.

Le modèle de Bowden et Tabor amélioré représente la composante d'adhésion interfaciale entre indenteur et matériau. Considérant que la composante d'adhésion non négligeable et se compte. Alors, le modèle de Goddard et Wilman [47] propose une hypothèse qui dite que la cission de frottement au contact matière / indenteur est parallèle à la surface initiale de l'échantillon.

Ce modèle est simplifié par Laval [48], il suppose que les contraintes sont uniformes sur toute la surface avec ce modèle nous pouvons d'estimer le coefficient de frottement local de Coulomb entre l'indenteur et le matériau à l'aide des mesures des forces normales et tangentielles au cours de l'essai de rayage.

Au cours de l'usinage, le matériau se divise en deux flux devant l'indenteur. Une partie plonge sous l'indenteur ou le contourne comme dans le cas du labourage, l'autre partie est évacuée vers le haut de l'indenteur sous forme de copeau. Le sens des cissions à l'interface va donc dépendre du mode d'écoulement que subit le matériau. Pour le labourage, la cission τ exercée par le matériau sur l'indenteur en un point M est dirigée vers le bas. Pour l'usinage si on fait l'hypothèse que toute la matière est évacuée par le copeau, la cission exercée sur l'indenteur est donc vers le haut (Figure IV.1). Les expressions du coefficient de frottement μ_0 sont données par les équations suivantes :

- labourage (Figure IV.1.a) :

$$\mu_0 = \frac{F_t}{W} = \frac{p \cos \theta + \tau \sin \theta}{p \sin \theta - \tau \cos \theta}$$

Ce qui conduit alors à :

$$\mu_0 = \frac{2 \left(1 + \frac{\pi \tan \theta}{P} \right)}{\pi \tan \theta - \frac{\pi}{P}}$$

- usinage (Figure IV.1.b) :

$$\mu_0 = \frac{F_t}{W} = \frac{p \cos \theta - \tau \sin \theta}{p \sin \theta + \tau \cos \theta}$$

$$\mu_0 = \frac{2 \left(1 - \frac{\pi \tan \theta}{P} \right)}{\pi \tan \theta + \frac{\pi}{P}}$$

Avec :

p : la contrainte locale normal à l'interface.

τ : la contrainte locale tangentielle à l'interface.

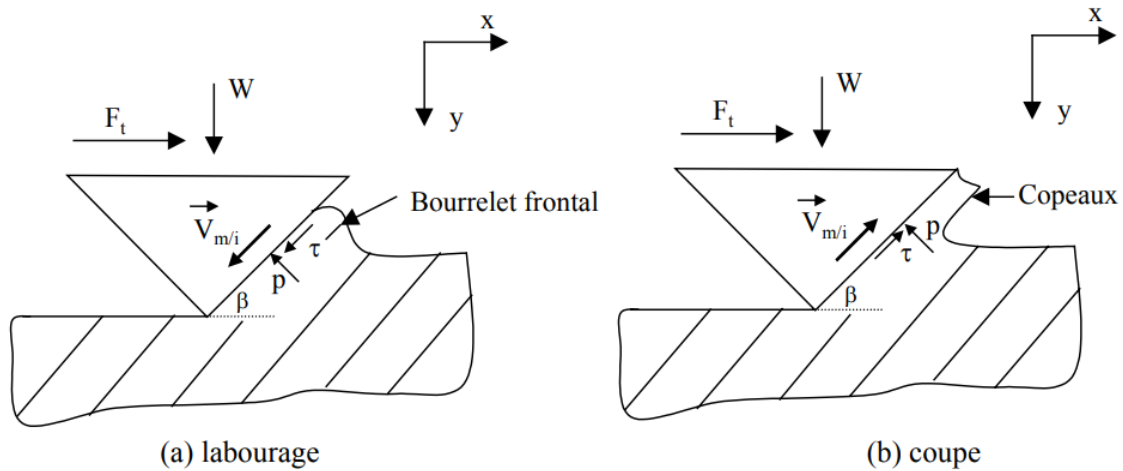


Figure IV.1. Représentation des contraintes de contact lors de la rayure

Par l'utilisation de ce modèle on peut d'estimer le coefficient de frottement local τ/p (dit aussi coefficient de frottement de Tresca). À l'aide du coefficient de frottement apparent, en employant les équations précédentes pour calculer le coefficient de frottement local relatif aux mécanismes d'usure susceptibles d'avoir lieu lors d'un processus de rayage. Les paramètres d'entrée de ce modèle sont liés principalement à l'interface (p et τ) et à la géométrie de l'indenteur θ .

IV.5. Modèle de comportement en 3D

Le coefficient de frottement interfacial, ainsi que l'écoulement de matière dans un espace à deux dimensions n'a pas été négligeable dans les modèles précédemment mais ils ont pris en compte. Pour être plus réaliste, il est intéressant de suivre l'écoulement de matière pendant le processus de rayage mais dans un espace à trois dimensions. Un modèle a été développé par Subhash et Zhang [49] qui prend en compte l'interaction indenteur / échantillon et le flux d'écoulement de la matière. Ils ont supposé que la surface de contact soit la surface d'un dôme (Figure IV.2).

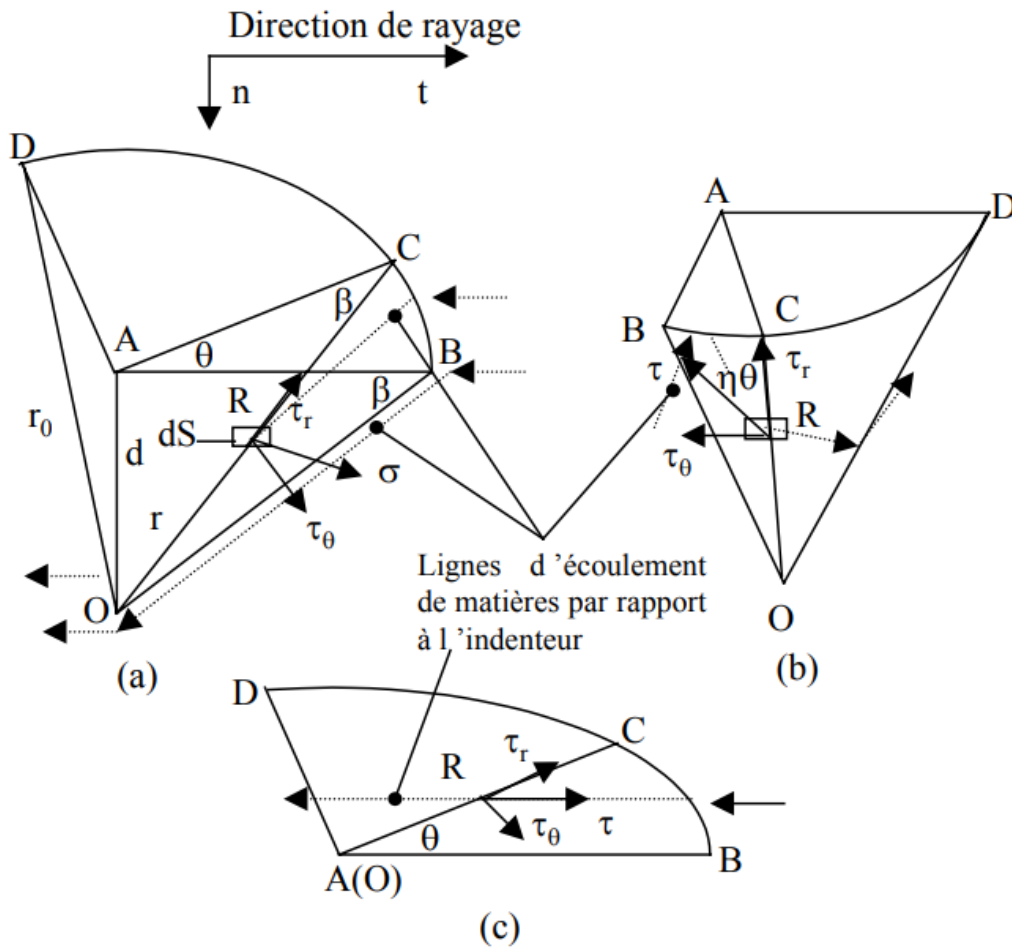


Figure IV.2. (a) surface de contact et différentes variables associées, (b) relation entre la direction d'écoulement du matériau et $\eta\theta$, (c) l'effort de cisaillement et les flux d'écoulement du matériau pour $\beta \rightarrow 0^\circ$ [48].

La figure IV.2 montre la surface de contact et l'écoulement de matière autour du cône en glissant de la gauche vers la droite. Dans cette figure OA présente l'axe du cône qui correspond à la profondeur de pénétration maximale, AB est le rayon de contact à la surface suivant la direction de glissement. L'angle $OCA = OBA = \beta$, l'angle induit entre les plans OAC et OAB est noté par θ , et R un point arbitraire de la surface de contact à une distance r du sommet du cône sur la ligne OC. Les contraintes normales et tangentielles en un point R sont notées par σ et τ , où σ est dans le plan OAC et perpendiculaire à la ligne OC et τ est donné par :

$$\tau = \mu_s \delta \tag{IV.8}$$

Où μ_s est le coefficient de frottement interfacial ou local.

Pour simplifier, on décompose τ en τ_r le long de direction OC et τ_θ normal au plan OAC, l'angle entre τ et la ligne OC est $\eta\theta$. A partir de la géométrie on a :

$$\tau_r = \mu_s \delta \cos \eta \theta \quad \tau_\theta = \mu_s \delta \sin \eta \theta \quad (\text{IV.9})$$

Avec η est un paramètre qui caractérise l'écoulement de matière autour de l'indenteur au cours de l'essai qui sera discuté plus loin.

Les contraintes totales appliquées par l'indenteur sont σ_t selon la direction de glissement et σ_n selon la direction axiale en un point R.

$$\delta_t = (\delta \sin \beta + \tau_r \cos \beta) \cos \theta + \tau_\theta \sin \theta$$

$$\delta_n = \delta \cos \beta - \tau_r \sin \beta \quad (\text{IV.10})$$

En combinant les deux équations précédentes on obtient :

$$\sigma_T = \sigma [\sin \beta \cos \theta + \mu_s (\cos \beta \cos \theta \cos \eta \theta + \sin \theta \sin \eta \theta)]$$

$$\sigma_n = \sigma (\cos \beta - \mu \sin \beta \cos \eta \theta) \quad (\text{IV.11})$$

Une petite surface de contact au point R peut s'écrire :

$$dS = r \cos \beta d\theta dr \quad (\text{IV.12})$$

Par l'utilisation des équations précédentes on obtient les expressions de l'effort normal F_N et tangentiel F_T :

$$F_t = 2 \int \sigma_t dS = 2 \int_0^{r_0} \int_0^{\pi/2} \sigma_t r \cos \beta d\theta dr$$

$$F_n = 2 \int \sigma_n dS = 2 \int_0^{r_0} \int_0^{\pi/2} \sigma_n r \cos \beta d\theta dr \quad (\text{IV.13})$$

Où $r_0 = d/\sin \beta$ est la longueur de la ligne OC. En considérant les équations précédentes et que σ est indépendante de l'angle θ et en intégrant les équations par rapport à θ on a alors :

$$F_t = 2 \cos \beta \left(\sin \beta - \frac{\mu_s (\eta + \cos \beta) \cos \beta \left(\frac{\eta \pi}{2} \right)}{\eta^2 - 1} \right) \int_0^{r_0} \sigma r dr$$

$$F_n = 2 \cos \beta \left(\frac{\pi \cos \beta}{2} - \frac{\mu_s \sin \beta \sin \left(\frac{\eta \pi}{2} \right)}{\eta} \right) \int_0^{r_0} \sigma r dr \quad (\text{IV.14})$$

C'est la contrainte normale qui lie avec les variables r , les propriétés de l'échantillon, le coefficient de frottement interraciale μ . Et l'angle d'attaque.

Comme la contrainte normale σ est inconnue. Alors, les équations précédentes sont insuffisantes pour déduire l'effort tangentiel et normal. Ces équations correspondent à la simulation numérique effectuée par Liu [50], le principe de cette dernière prouve que le maximum de l'effort tangentiel croît avec μ_s , alors que le maximum de l'effort normal décroît avec μ_s . avec une condition que : $0 < \beta < 90^\circ$.

Ou :

$$\mu_s > 0 \quad \text{et} \quad 0 < \eta < 2 \quad (IV.15)$$

A partir les formules de F_T on remarque qu'ils sont toujours positif. Et hors de la formule de l'effort normal qui ne peut pas être négatif on peut d'avoir :

$$\mu_s < \frac{\eta\pi \cot \beta}{2 \sin\left(\frac{\eta\pi}{2}\right)} \quad (IV.16)$$

On n'oublie pas que :

$$\lim_{\eta \rightarrow 1} \left(\frac{\cos\left(\frac{\eta\pi}{2}\right)}{\eta^2 - 1} \right) = -\frac{\pi}{4}$$

Alors, il n'y a pas de singularité pour $\eta=1$. En réalité $\eta\theta$ indique la direction du flux d'écoulement de matière le long de la surface de contact entre l'indenteur et l'échantillon. En prenant en compte les équations (IV.9) et (IV.15) et la contrainte $0 < \theta < 90^\circ$, nous avons toujours $\tau_\theta > 0$, ce qui signifie que τ_θ est comme indiqué sur la figure IV.2 et possède toujours une projection positive selon la direction de glissement. Cela nous mène à faire la supposition que $0 < \eta < 2$ car sinon le matériau s'écoule dans la direction du glissement ce qui donne un $\tau_\theta < 0$ qui contredit le mouvement physique entre l'indenteur et l'échantillon.

Comme η est varié, implique que τ_r doit être aussi varié. Si $0 < \eta < 1$, la figure IV.2 précédente présenter la direction permanente de τ_r de ce qui signifie que le matériau s'écoule vers le bas en dessous de l'indenteur. Si $\eta=1$, $\tau_r=0$ quant $\theta=90^\circ$, c'est à dire que le matériau s'écoule vers le bas et à gauche tout au long de la surface de contact à l'exception de la ligne OD où le matériau s'écoule parallèle à la direction de glissement vers la gauche. Pour $1 < \eta < 2$, τ_r peut être nul, positif ou négatif suivant la valeur de θ . la valeur critique de θ peut alors être définie en prenant $\cos\eta\theta = 0$, ce qui donne :

$$\theta_c = \frac{\pi\eta}{2}$$

Si $\theta < \theta_c$ le matériau s'écoule vers le bas et à gauche dans La (figure IV.2.a) Mais si $\theta_c < \theta < 90^\circ$, le matériau s'écoule vers le haut et à gauche. L'écoulement réel du matériau est très complexe et dépend du mouvement relatif entre l'indenteur et l'échantillon, des propriétés du matériau, de la géométrie et du coefficient de frottement inter facial. A partir de l'équation (IV.14) on obtient :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}$$

Soit

$$\mu = \frac{2\eta \left[\sin \beta - \left\{ \mu_s (\eta + \cos \beta) \cos \left(\frac{\eta\pi/2}{(\eta^2-1)} \right) \right\} \right]}{\eta\pi \cos \beta - 2\mu_s \sin \beta \sin \left(\frac{\eta\pi}{2} \right)} \quad (\text{IV.17})$$

On n'oublie pas que le numérateur croît et le dénominateur décroît avec β et μ_s . c'est on a des grandes valeurs de μ_s et β veut dire que le coefficient de frottement peut être supérieur à 1.

Si on veut déterminer η , on considère par exemple $\beta=0^\circ$, c'est à dire l'angle au sommet de l'indenteur est de 180° . Tout le matériau s'écoule à droite lorsque l'échantillon plan se déplace vers la gauche et l'effort de cisaillement exercé par l'indenteur sur le matériau est exactement dans la direction de glissement. Donc l'angle $\eta\theta$ entre la ligne d'écoulement de matière et la ligne OC doit être égal à θ et on aura :

$$\tau_r = \mu_s \cos \theta \quad \text{et} \quad \tau_\theta = \mu_s \sin \theta \quad (\text{IV.18})$$

Alors, η doit être égal à 1 pour $\beta=0^\circ$. Cela implique aussi que pour des faibles angles d'attaque on suppose $\eta=1$. On attient alors :

$$\mu = \frac{2 \sin \beta + \mu_s \pi (\cos (\beta/2))^2}{\pi \cos \beta - 2\mu_s \sin \beta} \quad (\text{IV.19})$$

La formule précédente reste pas la même sera modifié si on des plus grandes angles d'attaque.

Si on emploi l'équation (IV.19) pour trace le coefficient de frottement en fonction de μ_s et β , on regarder une variation linéaire que pour des faibles valeurs et les valeurs se superposent avec les courbes numériques. Au contraire l'écart devient important pour des grandes valeurs de μ_s et β . Ceci est toujours un cas particulier de l'équation (IV.19) ($\eta=1$) qui n'est valable que pour des faibles angles d'attaque β . En traçant l'équation (IV.17) en fonction de η pour des valeurs constantes de μ_s et β , on remarque que μ ne varie pas significativement en fonction de η ou r des faibles valeurs de μ_s et β . En comparant avec la simulation numérique et pour obtenir une bonne corrélation, on utilise une fonction reliant η , μ_s et β . Une telle relation $\eta = 1 + \mu_s \sin \beta$ donne une bonne corrélation entre les valeurs de ce modèle et la simulation numérique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude de la mécanique de contact dans ce mémoire permet de conclure les suivants :

- L'étude de la mécanique de contact entre solides est un phénomène très complexe et il conduit à un ensemble de relations qui donnent l'aire réelle totale de contact, le nombre de microcontacts, la charge et la conductance entre deux surfaces en fonction de la séparation de leurs plans moyens. Alors que la séparation dépend de la pression nominale (c'est-à-dire de la charge divisée par la surface nominale de contact), le nombre de microcontacts et la surface totale de contact ne dépendent que de la charge.
- Le frottement entre corps solides, dissipe de l'énergie et use les surfaces en contact.
- L'étude de la mécanique de contact entre solides appartient au domaine de la tribologie qui étudie les aspects scientifiques et technologiques liés au frottement, à la lubrification et à l'usure des matériaux.
- Expérimentalement et la tenue à l'usure, le processus d'usure peut, en effet, être introduit si seulement les cinq éléments de base, agissent l'un avec l'autre.
 - ✓ Corps de frottement
 - ✓ La contre-matière
 - ✓ Matière intermédiaire
 - ✓ La charge
 - ✓ Le mouvement.
- Ils existent des méthodes qui permettent de mesurer la vitesse d'usure en continu pendant l'essai, on détermine le volume usé en fin d'essai seulement. En divisant par la durée de l'essai, on obtient alors la vitesse d'usure moyenne. Les mesures suivantes permettent de quantifier le volume usé.
 - ✓ Pesage de l'échantillon usé.
 - ✓ Déplacement du crayon par rapport à la surface de départ.
 - ✓ Étendue de la zone usée (surface, section).
 - ✓ Quantité de produit d'usure.

Bibliographie

- [1] Y. BERTHIER, "Tribologie, science carrefour", Journée Européenne du freinage J.E.F.92, Décembre (1992), Lille France.
- [2] DROUIN et al, "Manuel éléments de machines". Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986
- [3] Bhushan, Bharat, and Pak Lim Ko. "Introduction to tribology." *Appl. Mech. Rev.* 56.1 (2003): B6-B7.
- [4] Raja J. «Filtering of Surface Profiles.» *Ann. CIRP* 38 (2000): 96-99.
- [5] G. Ingle Bert, T. Da Silva Botelho, and I. Lemaire Caron. Théorie du contact de hertz contacts ponctuels ou linéiques. In *Techniques de l'Ingénieur*, number TRI 200, page 12.
- [6] RABINOWICZ.E, friction and wear of materials, John Wiley and sons Inc. , New York London – Sydney (1965).
- [7] Stick-slip motion in boundary lubrication, Tribology Series, 7, Elsevier, Amsterdam.
- [8] R. NOUAILLETAS, Modélisation hybride, identification, commande et estimation d'états de système soumis à des frottements secs – Application à un embrayage robotisé, thèse de doctorat, Grenoble INP, 2009.
- [9] G. SPINLER, Conception des machines, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997, Lausanne, vol. 1, 566.
- [10] F. P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids I, Clarendon Press Oxford 1950.
- [11] G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et contacts, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [12] N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007.
- [13] PEGNA J., TROCHU F, Eléments de la tribologie, Cours Théoriques sur le frottement, l'usure et la lubrification, 2003.
- [14] WIKIBOOK, Cours de tribologie, Encyclopédie Wikipédia, 2004, <http://fr.Wikibooks.org>.
- [15] M. REDHA, Contribution à l'étude des contacts mécaniques du couple cuivre acier traversé par le courant électrique, 2007, mémoire de magister, université de Skikda.
- [16] STATIQUE : LOIS DE COULOMB. COURS. Lycée Jules Ferry -Edition 1 – Cannes 2018.
- [17] B.G. Mellor. Surface coatings for protection against wear, Woodhead Publishing © 2006
- [18] P. Kapsa, M. Cartier, Usure des contacts mécaniques-Manifestation de l'usure, Techniques de l'ingénieur, 2001, BM 5067. JEAN BLOUET "Usure et frottement" T. ing. A 3139.
- [19] Garbacz, Halina, et al., eds. Nanocrystalline titanium. Elsevier, 2018.
- [20] N. Brunetière : Introduction à la Tribologie Institut P.prime Futuroscope 2016
- [21] Les lubrifiants moteur pertes par frottement et usure” , Publications de l'Institut Français du Pétrole. Collection colloques et séminaires, 33, Paris : Ed. Technip, 1979.

- [22] T.A Dow, Thermoelastic effects in brakes, *Wear* 59(1980)213-221.
- [23] J. M. George, Frottement, usure et lubrification. La tribologie où Sciences des surfaces, CNRS Editions ; ISBN10 : 2-212-05823-3, (2000).
- [24] J. Pegna, F. Trochu, Elément de la tribologie sur le frottement, l'usure et la lubrification, 2003.
- [25] Gérald Zambelli, Léo Vincent Matériaux et contacts une approche tribologique, 1998
- [26] N. S. McIntyre, D. G. Zetaruk, D. Owen : "XPS study of initial growth of oxide film on Inconel 600 alloy. 1978.
- [27] K. Endo, H. Goto : "Effects of environment on fretting fatigue", *Wear*, Vol. 48, 1978.
- [28] Hawk, J. A., Wilson, R. D., Tylczak, J. H., Dogan, O. N., Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation, *Wear*, 225-229, part 2 (1999), p. 1031-1042.
- [29] Spero, C., Kirkcaldie, R. K. and Flitt, H. J., Review of test methods for abrasive wear in ore grinding, *Wear*, 146 (1991), p. 389-408.
- [30] Finnie, A.M.A.L., A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester. *Wear*, 60 (1980), p. 111-121.
- [31] COMBRES (Y.) et CHAMPIN (B.). – Traitements thermiques des alliages de titane. M 1 335. *Traité Matériaux métalliques*, volume M4, 1995.
- [32] Murray J. L., *Phase Diagrams of Binary Titanium Alloys*, ASM Int. Metal Park, Ohio (USA), 1987.
- [33] Zambelli G., Vincent L., *Matériaux et Contacts: Une approche tribologique*, Presses Polytechniques et Universitaire Romande Lausanne, Editor, (1998).
- [34] MEZLINI, Salah. L'école centrale de lyon. Diss. Ecole Centrale de Lyon, (2003).
- [35] Avery, H. S., Classification and precision of abrasion tests, *Wear of Materials* (1977), ASME 1977.
- [36] Samuels, L., *New developments in grinding*, (M. Shaw), Carnegie Press (1976).
- [37] Hokkirigawa, K., Kato, K., and Li, Z. Z., The effect of hardness on the transition of the abrasive wear mechanism of steels, *wear*, 123 (1988), p. 241.
- [38] Kato, K., Micro-mechanisms of wear - wear modes, *Wear*, 153 (1992), p. 277-295.
- [39] Bucaille et Felder, L'essai de rayure sur polymers et métaux modélisations et approches expérimentales, *Matériaux et Techniques*– N° 3-4, (2001), p. 29-43.
- [40] Tabor D. , *The Hardness of Metals* , Clarendon Press , Oxford , (1951).
- [41] Johnson K. L. , The correlation of indentation experiments, *J. Mech. Phys. Solids* , vol. 18 (1970), p. 115-126.
- [42] Briscoe B. J., Pelillo E. and Sinha S. K. Scratch hardness and deformation maps for polycarbonate and polyethylene, *Polymer Engineering and Science*, 36, n°24 (1996), p. 2996-3005.
- [43] Atkins A. G. and Tabor D. Plastic indentation in metals with cones , *J. Mech. Phys. Solids* , 13 (1965), pp. 149-164.
- [44] Brookes C. A., Green P., Harrison P. H. and Moxley B., Some observations on scratch and indentation hardness measurements, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 5 (1972), p. 1284-1293.
- [45] Felder E., Le contact métal-outil en mise en forme des métaux – tome II: Modèles microplastiques: interaction métal-outil rugueux, chapitre D. III. Cours, CEMEF-Ecole des Mines de Paris, (1996).

- [46] Bowden F. P. and Tabor D. Friction, lubrication and wear: a survey of work during the last decade, Br. J. Appl. Phys., 17 (1966), p. 1521-1544.
- [47] Goddard J., Wilman H., A theory of friction and wear during the abrasion of metals, Wear, 5 (1962), p. 114-135
- [48] Laval, P., Etude théorique et expérimentale de l'indentation des matériaux élastoplastiques homogènes ou revêtus. Application à la mesure de la rhéologie et de l'adhérence des films minces. Thèse de doctorat en science de génie des matériaux, Ecole Nat. Sup. des Mines de Paris, (1998) N° 1998-27
- [49] Subhash, G., W. Zhang, Investigation of the overall friction coefficient in single-pass scratch test, Wear, 252 (2002), p. 123-134
- [50] Liu, Z., Sun, J., Shen, W., Study of plowing and friction at the surfaces of plastic deformed metals. Tribology International 35 (2002), p. 511-522.