

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Notes de cours

Titre:

Tribologie et Mécanique de Contact

Réalisé par:

Dr. ATMANI Taous Doria

Année Universitaire 2023/2024

PREAMBULE

Ce polycopié intitulé « Tribologie et mécanique de Contact » s'adresse aux étudiants Master1, spécialité électromécanique et d'autres spécialités éventuellement. Il constitue également le premier volet du cours intitulé « Tribologie et Lubrification des Systèmes mécaniques » destiné aux étudiants Master2 de spécialité Maintenance Industrielle. Il répond au programme officiel du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Ce cours a pour objectif de transmettre à l'étudiant des concepts de base sur la tribologie et la mécanique de contact. Il constitue un support pédagogique qui permet d'introduire l'étudiant dans la formation de spécialité en électromécanique. Il est rédigé d'une manière simple afin de faciliter à l'étudiant l'assimilation et la compréhension des cours dispensés.

Ce cours est fondé sur les connaissances de plusieurs modules tels que la mécanique des surfaces, la science des matériaux, la thermodynamique et la physique moléculaire.

L'analyse du système tribologique constitue l'outil de référence d'aide à la définition et à l'étude d'une configuration de frottement. Bien que très complexe, cette analyse doit permettre en particulier :

- d'exprimer rationnellement le cahier des charges du problème à résoudre,
- d'identifier les situations à risques,
- d'appréhender les implications liées à telle ou telle option technologique (conception géométrique, cinématique...). les matériaux ne constituent qu'une partie de la solution à un problème d'usure. De nombreux exemples de la pratique industrielle montrent que des solutions rationnelles peuvent être mises en place en agissant prioritairement sur l'optimisation de la géométrie ou de la topographie des contacts, sur une meilleure gestion du milieu environnant.

Le cours s'articule donc sur les principaux axes de la tribologie, présentés en trois parties :

La première partie permet au lecteur de s'initier à la tribologie ; les concepts de base y sont cités. Une description succincte de la surface de frottement est présentée avec les différents moyens de caractérisations, ainsi qu'une explication du phénomène de frottement et les paramètres influents.

La deuxième partie concerne la description des différents mécanismes de détériorations des surfaces frottantes, avec présentation de quelques exemples de pièces usées dans industrie. Une approche quantitative de l'usure est également présentée.

Enfin la dernière partie, est dédiée aux moyens de protection des surfaces frottantes, tout particulièrement les traitements et revêtements de surface.

Ce polycopié a été rédigé à l'usage des étudiants du Génie Mécanique en Master, filière Electromécanique options Mécatronique et Maintenance Industrielle. Il résulte d'une investigation dans le domaine de la tribologie. Il est basé sur un travail de recherche personnel, sur la tribologie, associé à une compilation structurée de plusieurs sources : ouvrages, chapitre et articles disponibles librement sur Internet. Il n'a donc aucune prétention d'originalité.

Sommaire

PREAMBULE.....	2
I. Le système tribologique	8
I.1 Introduction	9
I.2 Etude des surfaces réelles	13
I.2.1 Structure d'une surface usinée	14
I.2.2 Défauts de surface	15
I.2.3 Caractérisation pratique des surfaces réelles.....	16
I.2.4 Caractérisation topographique des surfaces	17
I.3 Contacts des corps solides	23
I.3.1 Contact ponctuel ou linéique (contact Hertzien).....	23
I.3.2 Contacts surfaciques.....	24
I.4 Frottement.....	27
I.4.1 Frottement sec	27
I.4.2 Force de frottement de roulement	34
I.4.3 Influence des paramètres intrinsèques et extrinsèques sur le frottement	36
II. Usures.....	37
II.1 Introduction	38
II.2 Dégradation des surfaces	38
II.3 Formes d'usures.....	40
II.3.1 Usure adhésive	40
II.3.2 Usure abrasive	45
II.3.3 La fatigue de contact	50
II.3.4 Effets physiques et chimiques	57
II.3.5 La cavitation.....	59
II.3.6 Erosion	61
II.3.7 Approche quantitative de l'usure	63
II.4 Technique de caractérisation tribologique.....	63
II.5 Analyse de l'endommagement de surface	66
II.6 Estimation du taux d'usure.....	68
III. Traitements superficiels et Revêtements.....	69
III.1 Introduction.....	70
III.2 Amélioration de la résistance des surfaces par revêtement.....	70
III.3 Propriétés de surface d'un revêtement.....	71
III.4 Principe d'élaboration des revêtements	74
III.5 Techniques de déposition du revêtement.....	76
III.5.1 Dépôts électrolytiques	76

III.5.2	Revêtements par projection	77
III.5.3	Rechargement par faisceau laser	78
III.5.4	Les dépôts en phase vapeur	79
	Références Bibliographiques.....	87
	Annexe	88

Liste des figures

Figure I.1	: Bas-relief restauré à Kouyunjik,.....	10
Figure I.2	: Transport de statue.	10
Figure I.3	: Dispositifs d'essai pour étudier le frottement, Léonard de Vinci.....	11
Figure I.4	: Les axes de la tribologie	13
Figure I.5	: Structure d'une surface métallique usinée.....	15
Figure I.6	: Les ordres de défauts d'une surface géométrique	16
Figure I.7	: Structure de surfaces.....	16
Figure I.8	: Profil en 2D d'une section de surface.....	17
Figure I.9	: Représentation des critères physiques de l'état d'une surface réelle.	19
Figure I.10	: Représentation des courbes de distribution et de portance mettant en évidence la symétrie et l'aplatissement des rugosités de surface.....	19
Figure I.11	: Représentation d'une surface polie avec un profil non gaussien	20
Figure I.12	: Rugosimètre mécanique.	20
Figure I.13	: Mesure des défauts de surface par un profilographe.....	21
Figure I.14	: Profilomètre optique (Wyko NT-1100) et calcul statistique des paramètres de rugosité	21
Figure I.15	: Exemple de profils de surface en 1D, 2D et 3D,.....	22
Figure I.16	: (a) Technique d'analyse AFM et (b) image (5x5) μm^2 de revêtement CrAlN ..	22
Figure I.17	: Contacts a) ponctuel, b) linéique et c) annulaire.	23
Figure I.18	: Représentation de la répartition de contraintes dans un contact a) ponctuel et b) linéique cylindre-cylindre.....	24
Figure I.19	: Contacts surfaciques.....	24
Figure I.20	: Contact réel a) contact d'une aspérité et b) aire réelle de contact.....	26
Figure I.21	: Représentation schématisée des forces agissant au point de contact.....	28
Figure I.22	: a) cône d'adhérence et b) cône de frottement.....	29
Figure I.23	: Evolution du coefficient de frottement selon la charge tangentielle. garbuio.....	29
Figure I.24	: Etape du passage d'une aspérité sur une autre.	30
Figure I.25	: Frottement avec roulement.....	34
Figure I.26	: Représentation schématisée d'un système tribologique.	35
Figure II.1	: Coupe schématisée de l'interface en tribologie.	39
Figure II.2	: Usure adhésive	41
Figure II.3	: Schématisation du mécanisme de l'usure adhésive	41
Figure II.4	: Transfert de la matière. Stachowiak.....	42
Figure II.5	: Modélisation du processus de déformation et de détachement d'une particule de débris en fonction de la taille des aspérités	43

Figure II.6 : a) Mécanisme de formation de l'usure sévère, le grippage. b) Micrographies représentant le phénomène de grippage (scuffing) sur une bague de roulement.	44
Figure II.7 : Photos représentant des pièces mécaniques ayant subies l'usure adhésive.	44
Figure II.8 : Illustration des mécanismes de l'usure par abrasion.....	45
Figure II.9 : Micrographie d'une strie issue de l'action abrasive d'un matériau	46
Figure II.10 : Diminution de l'effet abrasif par élimination des arêtes tranchantes des particules abrasives.....	47
Figure II.11 : Influence du matériau (ductile/fragile) sur l'effet d'abrasion.....	48
Figure II.12 : Représentation schématique de la résistance à l'usure abrasive de différents matériaux en fonction de la dureté.	48
Figure II.13 : Photos représentant des pièces usées par abrasion.....	49
Figure II.14 : Représentation des modes de sollicitations selon les mouvements relatifs des surfaces en contact.....	50
Figure II.15 : Mécanismes de la fatigue et micrographie d'une surface usée par fatigue.....	51
Figure II.16 : Rupture « fragile » par clivage (métaux) coupes.	51
Figure II.17 Propagation lente d'une fissure, cycle par cycle déformation plastique cyclique : stries	51
Figure II.18: Représentation du phénomène d'écaillage.....	52
Figure II.19: Micrographies a) d'une écaille et b) de microécailles	53
Figure II.20 Exemple du phénomène d'écaillage a) sur une bague intérieure de roulement et b) sur la surface d'un pignon	53
Figure II.21 : a) Schéma du mécanisme de délamination et b) exemple de délamination d'une surface traitée superficiellement.....	54
Figure II.22 : Usure induite par petits débattements	55
Figure II.23 : Phénomène de fretting dans une aube de turboréacteur.....	55
Figure II.24 : Propagation de fissures de fatigue dans le pied d'attache d'une aube de turboréacteur.	56
Figure II.25 : Déformations plastiques superficielles	56
Figure II.26 : Effet du passage de courant.....	57
Figure II.27 : Mécanisme d'usure corrosive (à faible vitesse) et état de surface après une usure corrosive. Stachowiak	58
Figure II.28 : Rapide corrosion de surface (à haute vitesse).	58
Figure II.29 : Processus de cavitation	59
Figure II.30 : Photos montrant le phénomène de la cavitation créée expérimentalement par une hélice dans un tunnel d'eau.	60
Figure II.31 : Impulseur de pompe centrifuge avec une vue de la périphérie.....	60
Figure II.32 : Comportement des surfaces lors de l'érosion, en fonction de la ductilité du matériau et de l'angle d'incidence des particules.....	61
Figure II.33 : Influence de l'angle d'incidence des particules sur le taux d'usure.....	62
Figure II.34 : virole d'acier inoxydable Figure II.35 : Aube de turbine à gaz usée par érosion	62
Figure II.36: Tribomètre rotatif pion/disque (bille/disque) avec son schéma de principe	64
Figure II.37 : Courbe du coefficient de frottement	65
Figure II.38: Exemples de test tribologiques sur tribomètres rotatifs	66
Figure II.39 : Microscope électronique à balayage (JEOL JSM-6340F).	67
Figure II.40 : exemple d'une cartographie d'une piste d'usure obtenue à l'aide du MEB.	67
Figure II.41 : Exemple d'EDS, spécifiant la nature et la quantification des éléments chimiques présents dans la piste d'usure.	67
Figure II.42 : Technique de détermination du volume d'usure.....	68

Figure III.1 : Diversité des modes de traitement de surface et rechargement.....	75
Figure III.2 : Dépôt de revêtement par électrolyse.....	76
Figure III.3 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre	77
Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet à arc électrique.....	78
Figure III.5 : Mécanisme de formation du revêtement.....	78
Figure III.6 : rechargement laser.	79
Figure.III.8 : Principe d'une installation CVD et étapes d'une opération de CVD activée thermiquement.....	80
Figure III.9: Schéma de principe de l'évaporation.....	82
Figure III.10: a) Evaporation par effet Joule. b) Evaporation par bombardement électronique (filament).....	83
Figure III.11: Schéma PLD et principe de l'évaporation sous laser pulsé PLD	83
Figure III.12 : Schéma d'une installation PVD d'évaporation par arc.....	84
Figure III.13: schéma d'un bâti de dépôt RF à couplage capacitif	86

Le système tribologique

I.1 Introduction

La tribologie est une science complexe qui s'intéresse à l'étude des systèmes tribologiques constitués de corps en contact surfacique et dotés de mouvement relatif. Elle englobe la mécanique des surfaces, l'étude du *frottement* et de l'*usure* des systèmes ainsi que de la *lubrification*. Elle fait appel à la chimie, la science des matériaux et la physique Introduction moléculaire. Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques *Tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvement relatif.

L'immense perte provoquée par l'usure des machines et par le coût de l'énergie dissipée par frottement confère à la tribologie une importance économique certaine. La connaissance de la tribologie est donc une nécessité pour assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines tout en augmentant la durée de vie des systèmes mécaniques.

Bref Historique de la tribologie

Tout commença dès la préhistoire où l'homme découvrit la possibilité de générer du feu en *frottant* deux morceaux de bois ou encore en percutant des silex. Depuis, beaucoup de traces ont été laissées par les anciennes civilisations :

- ❖ La roue à rayons est apparue aux Indes vers 2500 ans avant J. C. et en Chine vers 1500 ans avant J. C.
- ❖ Les civilisations égyptiennes et mésopotamiennes avaient déjà développées des traîneaux et des chariots où les jantes étaient protégées d'une usure excessive à l'aide de clous. Le transport des blocs et des statues se faisait à l'aide de tronc d'arbre (Fig. I.1) tout en utilisant un système de lubrification (Fig. I.2).

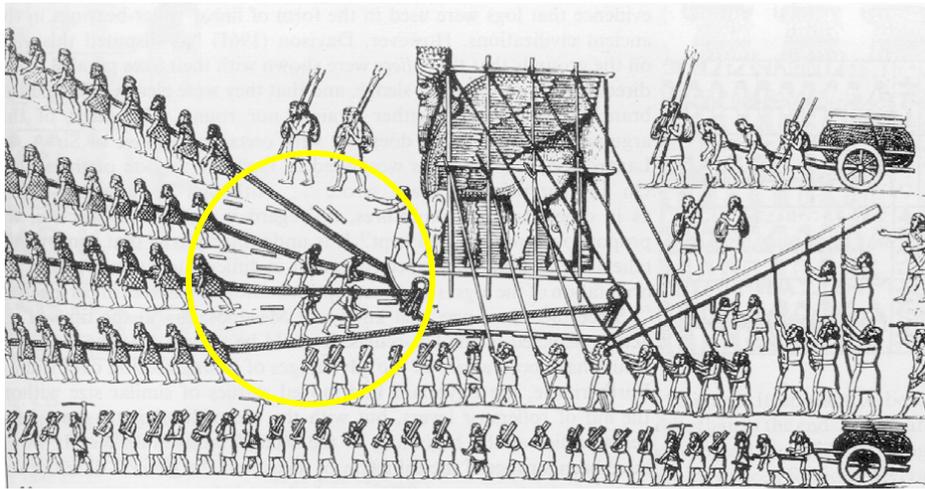


Figure I.1 : Bas-relief restauré à Kouyunjik, Assyrie, 700 avant J. C.

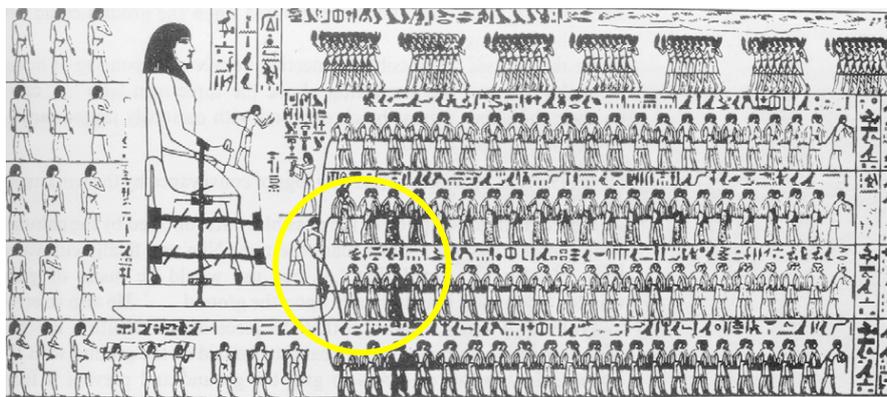


Figure I.2 : Transport de statue, tombe de Tchuti Hetep, El-Bersheh, Egypte, 1880 avant J. C.

- ❖ Les Grecs et les Romains ont développé l'usage de la roue ; ils connaissaient l'emploi des huiles végétales et animales comme lubrifiant. Les Romains connaissaient la butée à billes et à rouleaux coniques ainsi que les glissières à rouleaux cylindriques.
- ❖ Pendant la Renaissance, Léonard de Vinci (1452- 1519) contribua à la compréhension des phénomènes tribologiques en établissant les premiers préceptes, que la force de frottement dépendait de la charge normale mais qu'elle était indépendante de la surface apparente de contact (Fig. I.3). Deux cents ans plus tard, les travaux de Guillaume Amontons (1663- 1705) confirmèrent cette théorie.
- ❖ Le début de la révolution industrielle est marqué dans le domaine de la tribologie par Charles Augustin Coulomb (1736-1806).

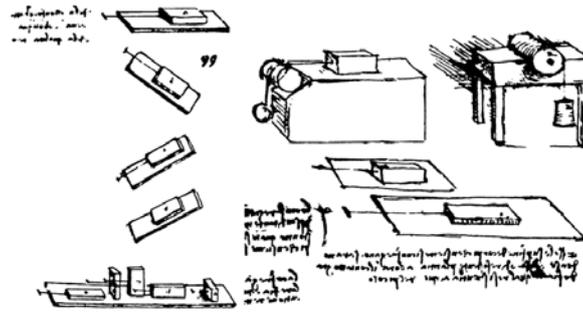


Figure 1.3 : Dispositifs d'essai pour étudier le frottement, Léonard de Vinci.

« Lubrification hydrodynamique : paliers et butées » Jean Frêne

- ❖ La mise au point au vingtième siècle des roulements à bille a eu un impact économique retentissant, sans négliger l'intérêt de l'introduction de la profilométrie par Abbot et Firestone en 1933.
- ❖ Grâce aux découvertes de Jean Louis Marie Poiseuille (1799-1869) et de celles d'Osborne Reynolds (1842-1912), très connu pour ses études des écoulements turbulents. Celui-ci a établi les bases de la lubrification hydrodynamique actuelle dans un article publié en 1886 ; la technologie des lubrifiants a connue dans cette période un essor incontestable.
- ❖ A partir des années cinquante de nombreux travaux ont été réalisés pour l'étude des mécanismes tribologiques dans divers domaines industriels, spatial et même biomédical. L'analyse de toutes les publications et réalisations effectuées depuis dans le domaine de la tribologie représente un travail considérable.

Avec la progression rapide de la technologie de l'instrumentation, l'apparition de microscope de pointe avec des résolutions élevées et d'instrument d'analyse de plus en plus performant, l'intérêt se concentre de plus en plus sur la tribologie à l'échelle microscopique et même nanométrique.

Les axes de la tribologie

Le développement de la tribologie repose surtout sur l'expérience dans laquelle sont mis en jeu des systèmes tribologiques, constitués de couples tribologiques en mouvement relatif. Le milieu constituant les surfaces de contact forme l'interface. A l'interface se combinent les caractéristiques surfaciques des deux solides avec le milieu extérieur et donnent lieu à de nouvelles caractéristiques propres à ce système. Le frottement naissant à

cette interface transmet une force tangentielle résistante au mouvement, à la surface de contact. Le glissement dissipe de l'énergie et use les surfaces. Le frottement n'est pas nécessairement un phénomène négatif, Il est soit utile soit parasite, il est nécessaire à la marche mais néfaste dans le cas des roulements. Selon les applications on cherche à obtenir :

- Usure et frottement minimaux dans les paliers, engrenages, cames, glissières ;
- Usure minimale et frottement maximal (adhérence) dans les freins, embrayages, roues ;
- Usure maximale par les meules et les limes.



Dans le cas des mécanismes de transmission, la lubrification est utilisée pour diminuer le frottement et par conséquent réduire l'usure. La lubrification consiste à interposer un troisième corps, fluide, poudre, ou autres entre les solides.

Le choix des matériaux en contact mobile, leur traitement de surface, le choix des méthodes de lubrification et des lubrifiants, constituent l'étude tribologique d'un mécanisme. Sur la figure I.4 sont représentés les principaux axes de la tribologie.

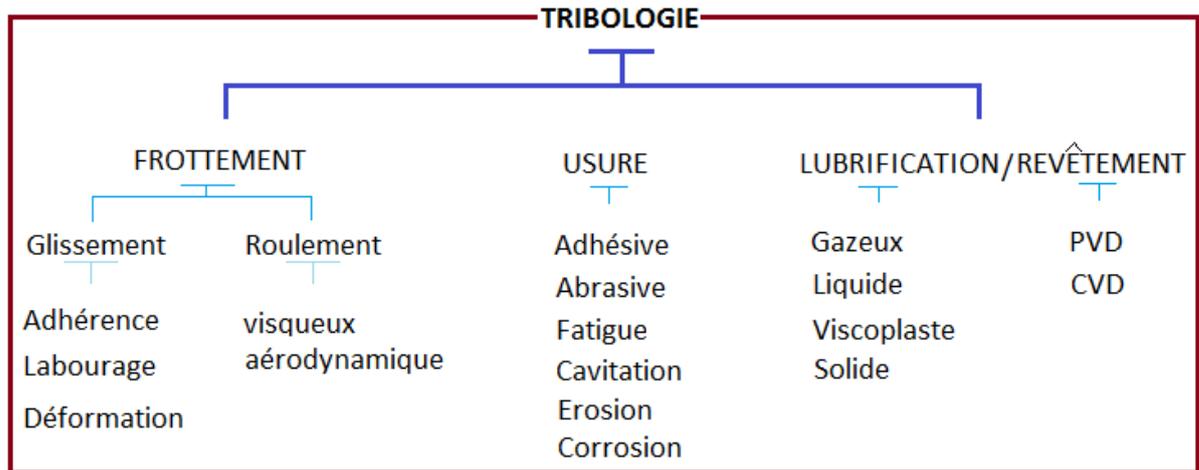


Figure I.4 : Les axes de la tribologie

I.2 Étude des surfaces réelles

Avant de traiter le système tribologique il est impératif de définir la surface qui est le siège de l'interaction des phénomènes physico-chimique et thermique du frottement. En effet, parmi les innombrables causes de la résistance des corps au glissement (frottement) on peut distinguer :

- D'une part les irrégularités des surfaces de contacts, ce qui détermine un enchevêtrement des aspérités, d'où la nécessité d'un effort tangentiel pour franchir ou creuser ces aspérités ;
- D'autre part, l'étendue réelle des surfaces en contact étant réduites à quelques zones où la pression est très forte, il en résulte une déformation très importante.

L'étude des surfaces revêt de l'importance dans un grand nombre d'applications industrielles. En effet, la surface d'un solide le sépare du milieu ambiant. Elle est caractérisée par sa structure physico-chimique et par sa géométrie. Les surfaces se subdivisent en trois catégories : les surfaces propres (idéales), les surfaces conditionnées (préparées en laboratoire) et les surfaces industrielles (réelles). La structure de la surface dépendra de sa catégorie.

L'aspect d'une surface industrielle dépend de l'ensemble des opérations réalisées ; en particulier, elle comporte toujours « l'empreinte » de l'outil de mise en forme. Chaque surface devra donc être contrôlée de façon appropriée, avant la mise en service.

I.2.1 Structure d'une surface usinée

Une surface usinée est une zone complexe qui recouvre la masse du solide comme une peau. Ses propriétés diffèrent de celles du corps du solide. Elle joue un rôle fondamental dans le comportement tribologique d'un couple cinématique puisque le frottement sec et l'usure naissent dans ces couches superficielles qui font à peine quelques microns d'épaisseur.

On distingue quatre couches (Fig. I.5) formant la surface d'une pièce métallique usinée :

- Le matériau de base au dessus duquel existe une zone rythmiquement sollicitée par les contraintes extérieures et qui est en cours d'écrouissage (de plus en plus écrouis en allant vers la surface) ;
- En profondeur, une couche de métal est écrouie par les opérations de fabrication de la pièce, que ce soit par formage, ou par enlèvement de copeaux. La structure cristalline du métal de base y est fortement déformée. La couche est le siège de contraintes résiduelles de compression ;
- Sur la couche écrouie existe souvent une couche métallique amorphe, formée de cristaux finement concassés, appelée couche de Beilby. Elle est produite par la fusion du métal puis son auto-trempeage par la masse froide voisine lors des opérations de finition. Cette couche épaisse de quelques angströms, bouche les inégalités de surface ;
- La structure électronique des atomes est perturbée au voisinage d'une surface, en raison de la rupture des liaisons. Les atomes à la surface extérieure possèdent des valences non saturées créant ainsi un champ de forces électrostatiques qui peut s'exercer à plusieurs angströms de la surface. Cette surface est très réactive, dès son contact avec une atmosphère, elle se recouvre assez rapidement de molécules et d'atomes étrangers. L'épaisseur de cette couche adsorbée est très faible : une à plusieurs couches atomiques. Les gaz ou les liquides ambiants sont adsorbés et peuvent ainsi réagir avec le métal pour former des oxydes ou y diffuser ; les couches d'oxyde sont de plus en plus saturées en allant vers la surface. L'adsorption d'huile ou de graisse joue un rôle important en lubrification ; la couche adsorbée est très tenace, elle isole le métal de base de tout contact direct. Les caractéristiques de cette couche dépendent de divers paramètres comme la nature du solide, l'orientation cristalline (si on travaille sur un monocristal), la température, la composition du gaz et les pressions partielles.

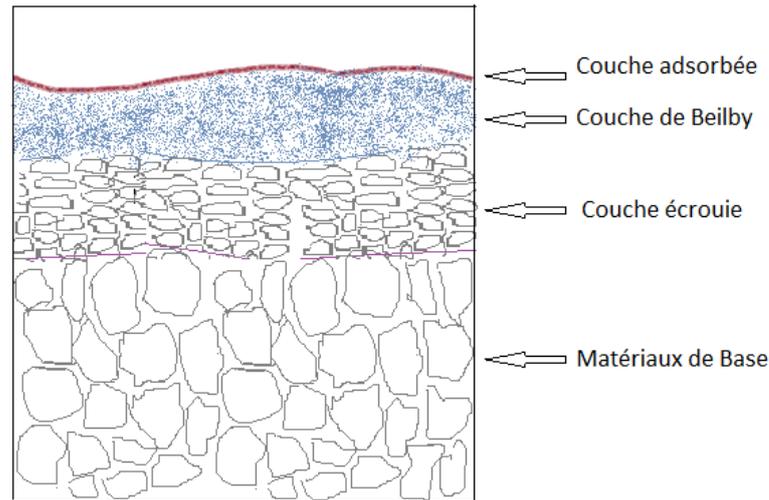


Figure I.5: Structure d'une surface métallique usinée

I.2.2 Défauts de surface

Toutes les surfaces portent des imperfections même si elles paraissent lisses au toucher et à la vue. Lors de l'usinage, peu importe la précision de la machine utilisée, il faut s'attendre à ce que les surfaces disposent d'irrégularités, celles-ci jouent un grand rôle dans le fonctionnement des mécanismes. On a classé les irrégularités (Fig. I.6) selon l'échelle qu'il faut choisir pour les observer :

- Les erreurs de forme (planéité conicité, perpendicularité, etc.) ou erreurs macro-géométriques, dites de *premier ordre*, proviennent des déformations de la pièce et de la machine-outil lors de l'usinage. Les défauts de forme se rapportent à la surface géométrique. On les mesure avec les instruments de métrologie comme le pied à coulisse ou le micromètre.
- Les irrégularités du *deuxième ordre* consistent en ondulations régulières engendrées par des vibrations de la pièce ou de la machine outil ; elles sont apparentes à l'œil nu.
- A plus petite échelle, visible seulement à la loupe ou au microscope, on rencontre la rugosité. Elle résulte de stries formées par l'avance progressive de l'outil et d'aspérités micro-géométriques se formant lors de l'arrachage de la matière par les outils elles sont de *troisième ordre* si leur distribution est périodique. Toutefois, il existe des rugosités apériodiques formant des parasites et qui constituent le *quatrième ordre*. Au-delà, on trouve encore la structure du grain des métaux.
- La structure de la surface présente un aspect différent en fonction du mode de traitement qu'a subi cette dernière (Fig. I.7).

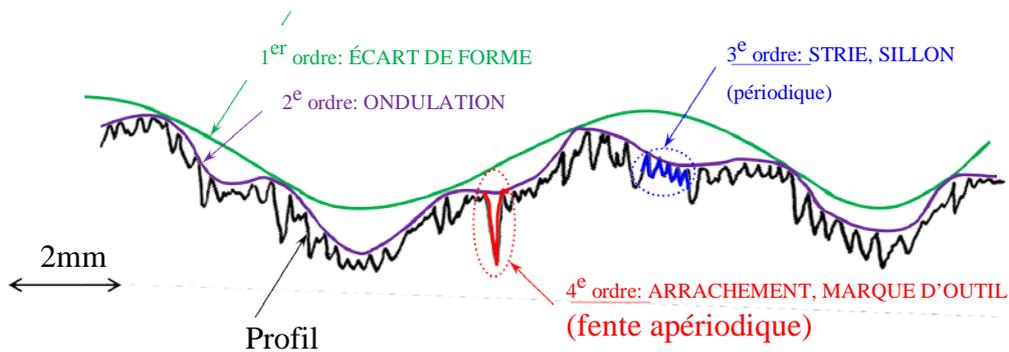


Figure I.6: Les ordres de défauts d'une surface géométrique

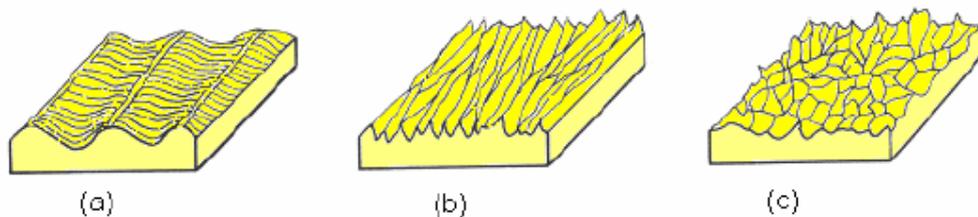


Figure I.7 : Structure de surfaces

(a) stries régulières ; (b) stries orientées ; (c) aspérités irrégulières (Jackson, R. L., Green, I., 2005).

On exprime la rugosité par des grandeurs normalisées.

I.2.3 Caractérisation pratique des surfaces réelles

La caractérisation des surfaces est l'utilisation de méthodes adaptées (analyse ou test) pour répondre à certains critères, et de définir la surface d'un matériau donné, ayant subi des opérations d'obtention et de préparation. Cette caractérisation est de type :

- *analytique* : connaître la nature des éléments chimiques, leur concentration, leur valence et parfois leurs liaisons chimiques. Les méthodes utilisées répondent au même principe ; le dispositif simplifié est constitué principalement d'une source fournissant un faisceau primaire et d'un analyseur pour traiter le faisceau secondaire ;
- *mécanique* : mesurer des déformations et, par le calcul, en déduire des contraintes associées avec leur signe (contraintes de tension ou de compression), leur intensité et, si possible, leur distribution. L'ensemble des contraintes peut conditionner, en partie, le comportement des pièces en service. Il existe diverses méthodes de détermination des contraintes résiduelles (destructive, semi-destructives et non-destructive).

- *structural et textural* : observer la taille et la forme des grains du matériau, leurs orientations et leurs textures. Il est à noter que ces caractéristiques ne sont pas les mêmes en surface (ou en zone superficielle) et à cœur. La texture est déterminée, en général, par des techniques de diffraction X ;
- *géométrique ou topographique* : tracer le profil de rugosité et déterminer certains critères physiques et statistiques associés à celui-ci.

I.2.4 Caractérisation topographique des surfaces

La topographie des surfaces résulte de la superposition de la rugosité et des erreurs de forme ; elle a une grande influence sur les propriétés d'un système tribologique. La mesure de cet état de surface permet d'améliorer la performance des produits en qualifiant une moyenne à ces défauts afin de la rendre conforme, ou non.

L'état de surface dispose de paramètres multiples (conformément aux normes internationales), et avant de citer les plus pertinents, quelques définitions sont nécessaires.

L'échantillon (surface) à caractériser (Fig. I.8 (a)) est soumis à une analyse topographique :

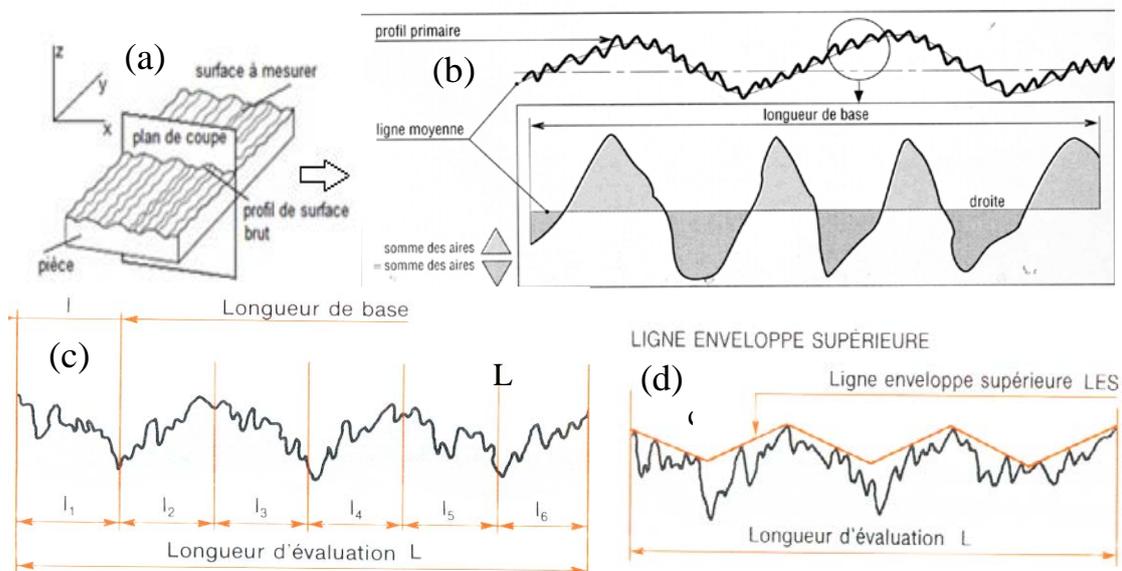


Figure I.8 : Profil en 2D d'une section de surface.

Définitions préliminaires

- La *longueur d'évaluation* L (échantillon) (Fig. I.8 (b)): elle est divisée en tronçons l successifs correspondant à la longueur de base.
- La *longueur de base* (Fig. I.8 (c)): pour chaque longueur de base, la ligne étant assimilée à une droite, la somme des aires au-dessus de la *ligne moyenne* est égale à la somme des aires au-dessous ; seule la rugosité demeure.
- La *ligne enveloppe supérieure* (LES) (Fig. I.8 (d)): Segments de droite joignant les points les plus hauts des saillies locales.
- La *ligne de référence arithmétique* est une ligne qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base, la somme des aires comprises entre elle et le profil, soit égale de part et d'autre.

Les critères d'états de surface les plus couramment utilisés sont :

➤ **Critères physiques**

- Macro-géométriques (ordre 2), l'ondulation W :
 - W la profondeur moyenne d'ondulation $W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} W_i$
 - A_w le pas moyen de l'ondulation $A_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (A_w)_i$
- Micro-géométriques (ordre 3 et 4), la rugosité :
 - R la profondeur moyenne de rugosité $R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} R_i$
 - A_r le pas moyen de rugosité $A_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (A_r)_i$
 - R_{max} la profondeur maximale de rugosité

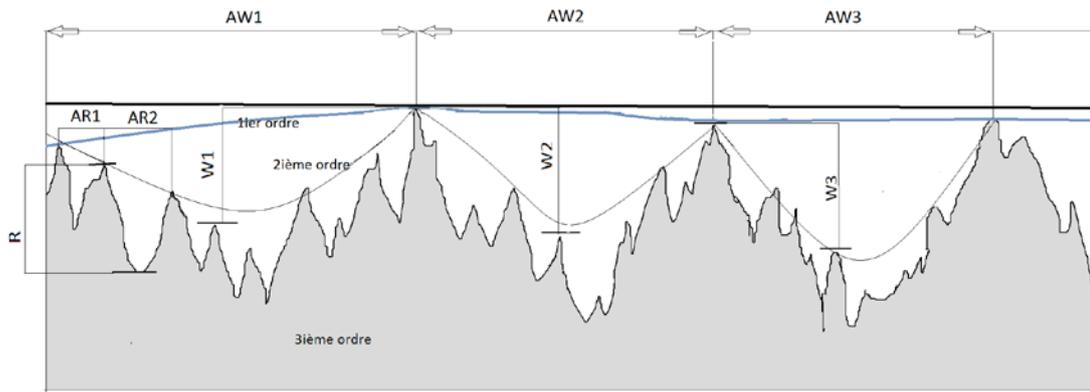
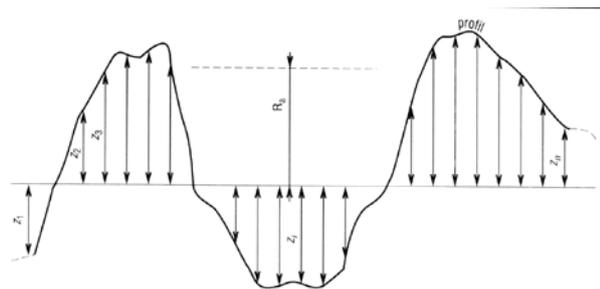


Figure I.9: Représentation des critères physiques de l'état d'une surface réelle.

➤ Critères statistiques

- Ra Écart moyen arithmétique :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx$$



- Rq la moyenne RMS des déviations :

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ri^2}$$

- Les paramètres statistiques de forme (Fig. I.10) permettent d'évaluer :

➤ l'asymétrie R_{sk} (Skewness) $Ssk = \frac{1}{A.Sq^3} \iint \tilde{Z}(x, y)^3 dx dy$

➤

et l'aplatissement R_{ku} (Kurtosis) $Sku = \frac{1}{A.Sq^4} \iint \tilde{Z}(x, y)^4 dx dy$

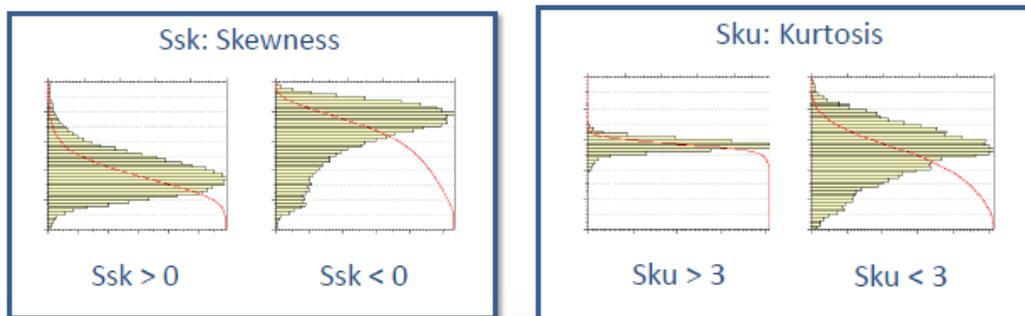


Figure I.10 : Représentation des courbes de distribution et de portance mettant en évidence la symétrie et l'aplatissement des rugosités de surface. (Brunetière, 2016)

Le taux de portance défini par la courbe d'abbott-Firestone (Fig. I.11), est un critère important en tribologie, il représente la capacité portante de la surface lors du fonctionnement.

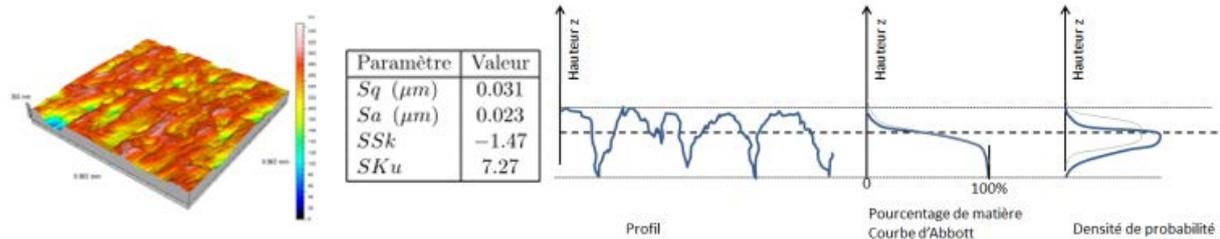


Figure I.11: Représentation d'une surface polie avec un profil non gaussien

Les instruments de mesure capables de qualifier l'état de surface d'une pièce, sont en général :

- Les Rugosimètres, appareil électronique à palpeur, ce sont des appareils de mesure qui permettent d'évaluer le profil de surface à l'aide d'un bras qui se déplace sur la surface à mesurer, sur une certaine distance normalisée. Le patin associé au palpeur permet d'éliminer les irrégularités d'ordre 1 et 2. Un traitement mathématique convenable calcule les rugosités (Figure I.12).

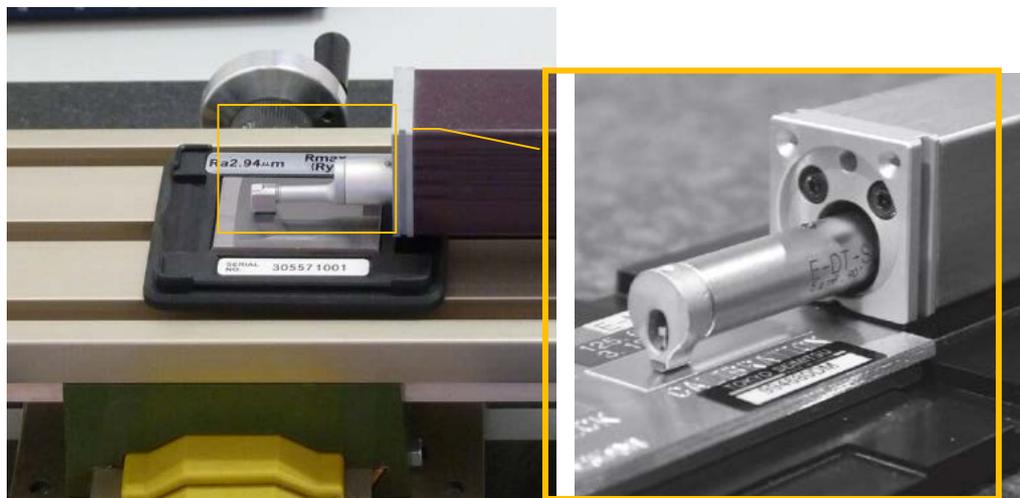


Figure I.12: Rugosimètre mécanique.

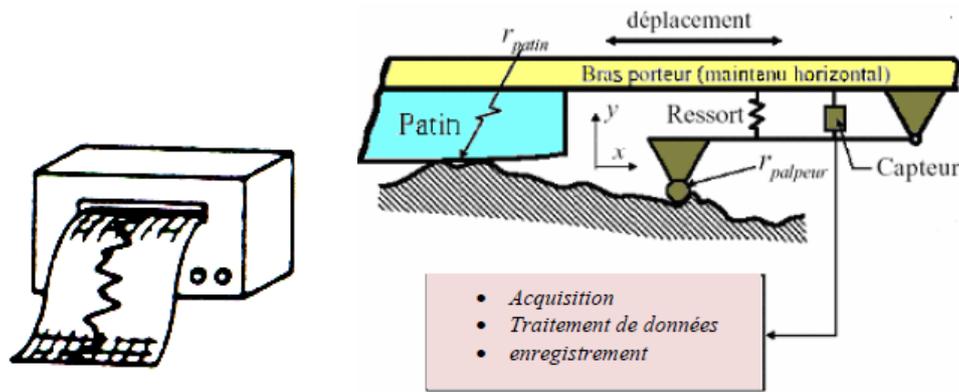


Figure I.13 : Mesure des défauts de surface par un profilographe. (Chang, W. R., 1987)

- Les Profilomètres, sont à l'origine des instruments de mesure avec contact qui lisait la surface à mesurer à l'aide d'une fine pointe en diamant (Figure I.13). Le déplacement du stylet sur le profil est transformé en signal électrique par le capteur, numérisé et ensuite traité à l'aide d'un ordinateur par des techniques statistiques. La méthode du profil par contact mécanique d'un palpeur introduit des erreurs de résolution, de distorsion et d'endommagement de la surface. Il existe toutefois des profilomètres optiques, ce sont des alternatives à la mesure de rugosité avec contact. On distingue deux types de profilomètres optiques, le profilomètre optique matriciel ou à balayage (Figure I.14 et exemples de profils de surface sur les Figures. I.15).

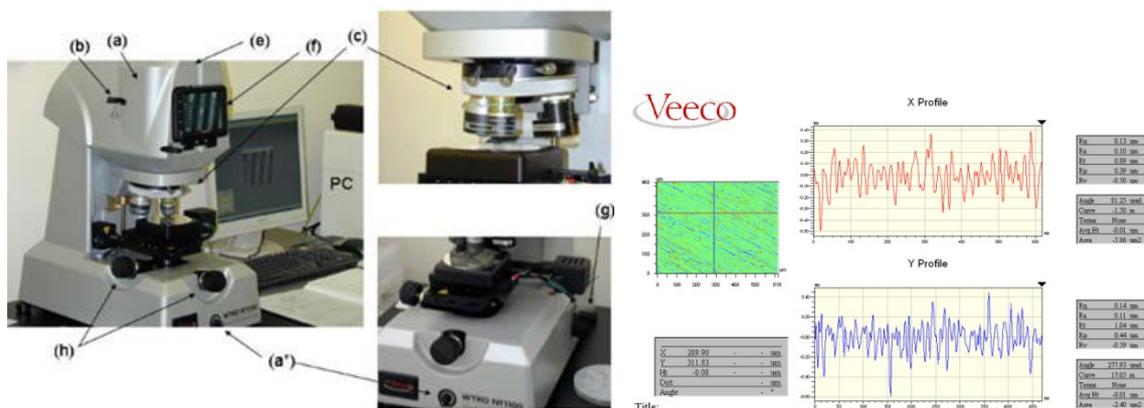


Figure I.14: Profilomètre optique (Wyko NT-1100) et calcul statistique des paramètres de rugosité

(Logiciel associé veeco)

- a) Lampe halogène (lumière blanche), (a*) réglage luminosité ; b) Filtres pour le mode PSI : Hig Mag (orange) et Low Mag (rouge) ; c) Objectifs ; e) Caméra CCD ; f) Ecran TFT ; g) Levier focal permettant de lever ou de baisser la colonne optique ; h) leviers de réglage manuel de la table.

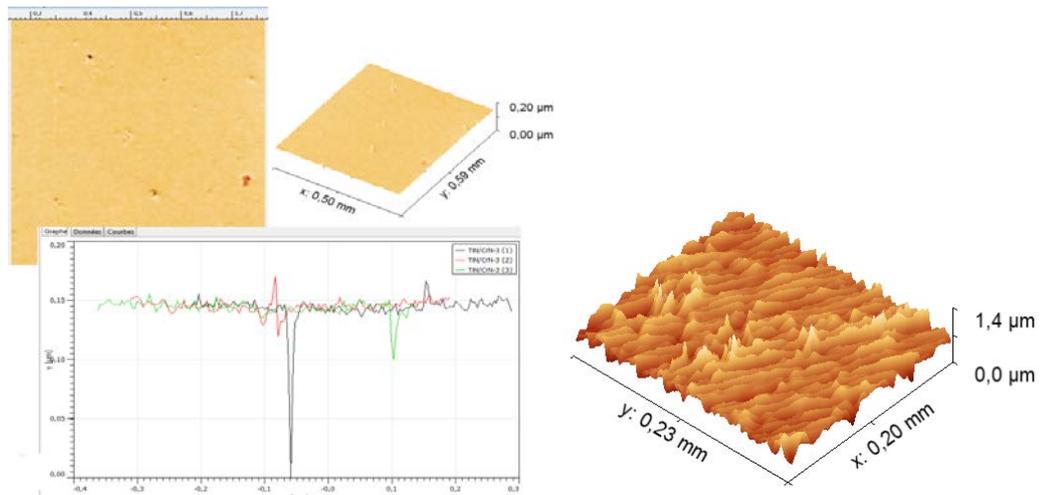


Figure I.15 : Exemple de profils de surface en 1D, 2D et 3D,

(Obtenus sur un profilomètre optique wyko)

- La Microscopie à Force Atomique : est une technique d'analyse de surface à une échelle comprise entre quelques dizaines de nanomètres et une centaine de microns (Fig. I.16). Elle permet d'analyser la topographie de la surface par imagerie et de calculer la rugosité, de caractériser le champ de forces de surface et de représenter une imagerie des forces de friction. Elle est également capable de quantifier la rugosité de surface des échantillons jusqu'à l'échelle de l'angström.

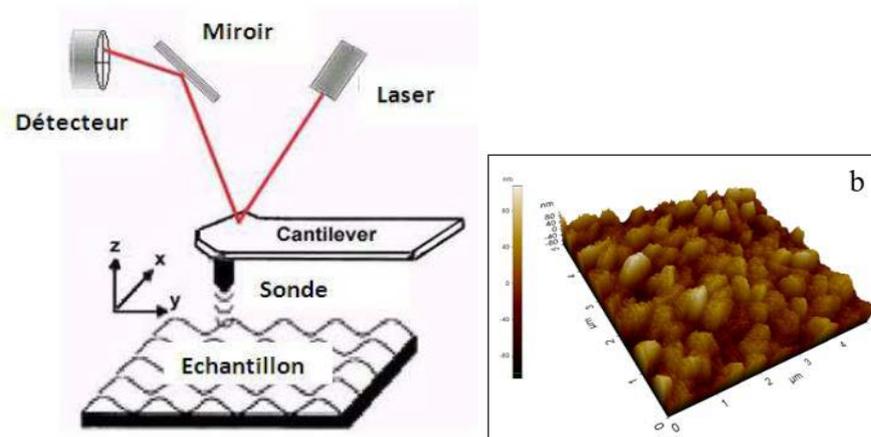


Figure I.16 : (a) Technique d'analyse AFM et (b) image $(5 \times 5) \mu\text{m}^2$ de revêtement CrAlN

On peut observer, que quel que soit le matériau utilisé pour la fabrication de pièces mécaniques, il convient d'ajuster l'épaisseur du « derme » d'une surface industrielle, ainsi que son état de surface car les propriétés d'emploi recherchées en dépendent.

I.3 Contacts des corps solides

Les types de contact entre les surfaces varient en fonction de la géométrie des solides en contact (généralement : plan/ plan, cylindre/ plan, sphère /plan). Ils se ramènent aux trois types suivants: contact surfacique, contact linéaire et contact ponctuel. L'étude des contacts a pour objectif de calculer l'aire de contact entre deux solides, la pression de contact entre les solides et la distribution des contraintes à l'intérieur des solides.

I.3.1 Contact ponctuel ou linéique (contact Hertzien)

Deux solides non-conformes se touchent apparemment en un point, ou selon une génératrice. Si une charge normale N est transmise de l'un à l'autre, on dit que la charge de contact est ponctuelle dans le premier cas, linéique dans le second, il s'agit des contact mettant en jeu des bille/plan, cylindre /plan, cylindre/sphère (Figure I.17).

Sous l'effet du chargement, les solides se déforment élastiquement, l'aire de contact pouvant être elliptique (cas général), rectangulaire (contacts cylindre/plan – cylindre/cylindre à axes parallèles) ou bien circulaire (contact bille/plan).

En réalité la pression la plus élevée (pression Hertzienne p_o) est concentrée au centre de la surface de contact (Figure I.18 (a)). Cette appellation se rapporte au Physicien Henry HERTZ qui a fait l'étude du contact non-conforme dans laquelle il a expliqué le comportement du matériau comprimé sous la surface de contact. La contrainte de cisaillement maximale de *Hertz* se trouve sous la surface de contact à une profondeur dépendant du rayon du cercle de contact. Lorsque la charge croît, les déformations et les contraintes augmentent, le métal entre en état de plastification autour du point le plus sollicité.

Dans le second cas elle est linéique (Figure I.18 (b)). La charge de contact se répartie selon un rectangle le long de la ligne de contact.

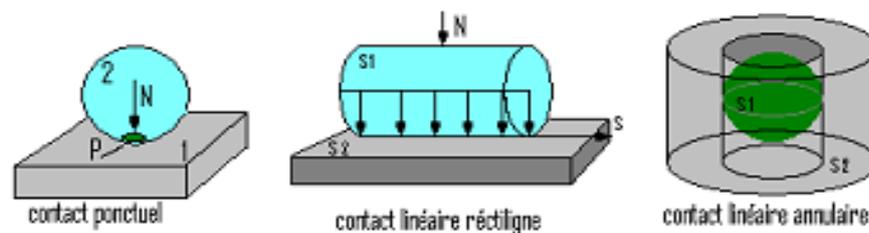


Figure I.17 : Contacts a) ponctuel, b) linéique et c) annulaire.

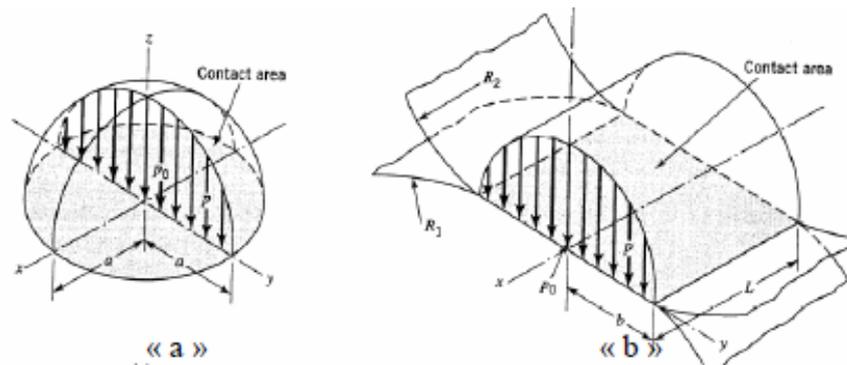


Figure I.18: Représentation de la répartition de contraintes dans un contact a) ponctuel et b) linéique cylindre-cylindre.

I.3.2 Contacts surfaciques

Deux pièces conformes se touchent par une surface géométrique finie, leur contact est dit surfacique telles que plan sur plan, cylindre dans cylindre, surfaces filetées, rotule (Figure I.19).

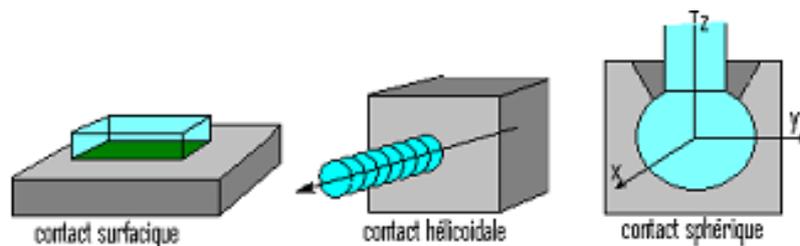


Figure I.19 : Contacts surfaciques

L'aire A contenue dans le contour de contact apparent est appelée surface de contact nominale ou apparente. La force normale d'appui étant N , on définit la pression de contact nominale ou apparente par P :

$$P = \frac{N}{A} \quad (0.1)$$

Ce calcul ne donne qu'une vision approximative, il ne prend pas en compte les défauts géométriques de forme, qui conduisent en fait à un petit nombre de points de contact et le jeu réel de fonctionnement.

En agrandissant fortement la coupe de la surface de contact de deux surfaces (Fig. I.20), les surfaces présentent chacune des aspérités dont certaines touchent ponctuellement la surface opposée (spot). L'aire de la surface de contact effective des aspérités est appelée surface de contact réelle A_r ; elle est plus petite que la surface apparente. Les aspérités de la plus part des surfaces sont déformées plastiquement sous la charge jusqu'à ce que la surface de tous les contacts soit suffisante pour supporter la charge. Avec cette hypothèse on peut écrire l'égalité suivante :

$$N = A_r \cdot \sigma_y \quad \mathbf{I.2}$$

où A_r est la surface de contact réelle, σ_y la pression de transition élastique/plastique du matériau en contact.

La pression de contact réelle est beaucoup plus forte que la pression de contact nominale ou apparente P .

Contact d'une aspérité

Une aspérité chargée par une force N_i subit tout d'abord une déformation élastique, le matériau subit ensuite une déformation plastique et l'aspérité s'écrase en agrandissant l'aire de contact (Figure I.20). La surface de contact de l'aspérité est :

$$A_{ri} = \frac{N_i}{P_e} \quad \mathbf{I.3}$$

Où P_e : pression de plastification (aspérité complètement écrasée) ;

Pour les métaux et une aspérité sphérique : $P_e \approx 3R_e$

Avec R_e : limite élastique du matériau.

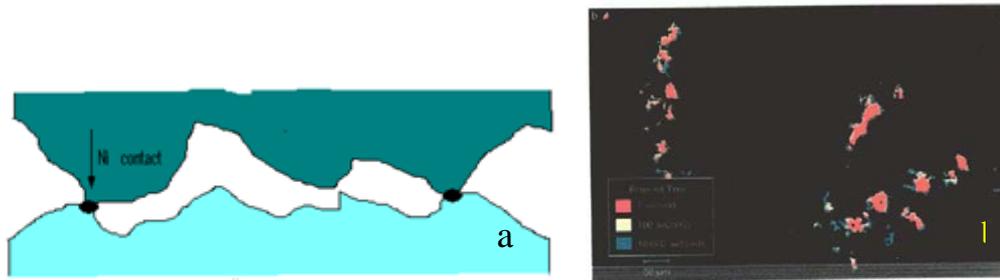


Figure I.20: Contact réel a) contact d'une aspérité et b) aire réelle de contact

En considérant l'ensemble de la surface apparente de contact, les pièces ne se touchent que par les aspérités les plus élevées, les aspérités s'écrasent et les pièces se rapprochent au fur et à mesure que la charge N augmente (la surface comprend des aspérités en état de déformation plastique et d'autre en état de déformation élastique). L'aire réelle de contact varie proportionnellement à la charge. L'augmentation de la surface de contact réelle avec la charge est due à l'accroissement du nombre de points de contacts, puisque : $N = \sum N_i$ et l'aire de contact réelle

$$A_r = \frac{N}{P_e}$$

A charge égale les déformations sont plus petites pour un métal dur que pour un métal mou.

Contact solide

Dans un système tribologique, les solides sont en contact selon une somme d'aires réelles élémentaires. Dans le cas d'un glissement, les zones de contact réelles sont ainsi sans cesse renouvelées, et le rapport aire apparente sur aire réelle peut alors varier, de façon significative, avec les paramètres de fonctionnement. Archard (1953) fût l'un des premiers à s'intéresser à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation élastique des aspérités, et en a établi un modèle qui relie à la fois la vitesse d'usure, la vitesse de glissement et les caractéristiques mécaniques des corps en contact. La loi qu'il a introduit est encore utilisée jusqu'à présent dans l'ensemble des recherches, bien qu'elle fut suivie par de nombreux modèles élaborés à l'issue d'études de recherche réalisées dans le domaine élasto-plastique. En effet, Greenwood et Williamson (1966) ont proposé une description simplifiée du contact surfacique, avec un modèle qui a l'avantage de mener à des relations analytiques très faciles à manipuler et à exploiter. Plus récemment, Robbe-Valloire et al. (2001) ont publié un modèle intégrant non seulement les déformations élastiques et élasto-plastiques, mais aussi des déformations totalement plastiques des aspérités.

I.4 Frottement

Bien que le phénomène de friction soit présent dans chacun de nos gestes, nous connaissons pourtant mal son origine et les mécanismes qui le régissent. L'étude du frottement permet d'établir des lois et/ou des modèles de frottement et cherche à caractériser et identifier les paramètres influents. Néanmoins, il reste encore aujourd'hui un phénomène physique mal compris sur le plan scientifique. Même si de nombreux travaux ont permis de préciser la notion de frottement, il reste encore des étapes à franchir avant de pouvoir obtenir des modèles de frottement et d'usure prédictifs. Aujourd'hui de nombreux travaux œuvrent dans ce sens.

Lorsque nous modélisons le frottement entre deux corps, nous définissons le *coefficient de frottement* comme le rapport existant entre l'effort résistant que les deux corps opposent au mouvement et l'effort presseur maintenant les corps en contact. Définir ce coefficient de frottement se révèle une tâche difficile tant elle requiert une description exhaustive du contexte d'exploitation. Il se voit diviser en sous catégories : frottement sec, hydrodynamique, mixte, sans ou avec troisième corps (le frottement en présence de lubrifiant sera traité dans la deuxième section).

I.4.1 Frottement sec

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans les zones superficielles de deux corps maintenus en contact et effectuant un mouvement l'un par rapport à l'autre en l'absence de lubrification.

Pour faire glisser deux solides en contact l'un par rapport à l'autre, il faut vaincre la force de frottement qui s'oppose à leur mouvement relatif. Cette notion élémentaire de physique, cache pourtant un vaste champ d'investigations et d'inconnues.

Force et coefficient de frottement de glissement

En appliquant une force tangentielle \vec{T} parallèle à la surface de contact du système tribologique représenté sur la figure I.21, la pièce 2 ne bouge pas, il existe donc une force F appliquée par 1 à 2 qui s'oppose à \vec{T} .

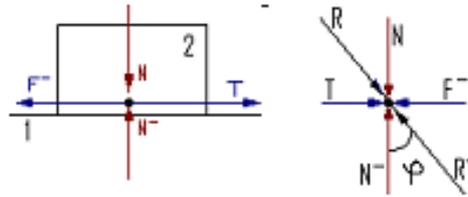


Figure I.21: Représentation schématique des forces agissant au point de contact.

L'angle de frottement φ indique l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à la surface, il définit le coefficient de frottement f (μ ou *cof*) du couple tribologique :

$$f = \frac{T}{N} \quad \text{I.4}$$

et $\varphi = \arctg \frac{T}{N}$ et $f = \operatorname{tg} \varphi$

Où f : coefficient de frottement ; T : force tangentielle ; N : force normale au mouvement.

Quand le solide est immobile du fait des frottements nous pouvons définir un facteur de frottement statique f_s défini à partir de la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle sans qu'il y ait de mouvement : $T \leq f_s N$.

En dessinant la résultante \vec{R} de toutes les petites forces élémentaires que reçoit le système de la part du plan, et tant que \vec{T} reste faible, le système est immobile (Figure I.22 (a)), le bloc est en équilibre : les trois forces ont des supports coplanaires, concourants, et leur somme est nulle. Il existe dans le contact des forces suffisantes pour maintenir le bloc immobile. On dit alors qu'il y a *adhérence*. L'angle de \vec{R} avec la normale n'a pas une valeur fixe, néanmoins il est limité par une certaine valeur dite *angle limite d'adhérence* la résultante \vec{R} se trouve dans/ou à la limite sur un cône de révolution, appelé *cône d'adhérence*, dont l'axe est perpendiculaire au plan.

En augmentant l'intensité de la force \vec{T} et à partir du moment où φ est supérieur à φ_o , le solide se met en mouvement ; le système est en glissement avec une vitesse constante \vec{V} (Figure I.22 (b)) la résultante \vec{R} se trouve sur un cône d'axe normal au plan et de demi-angle au sommet φ , appelé *cône de frottement*.

La force de frottement en réaction au glissement devient constante et s'écrit :

$$T = fd.N$$

$$0.5$$

avec $fd < fs$

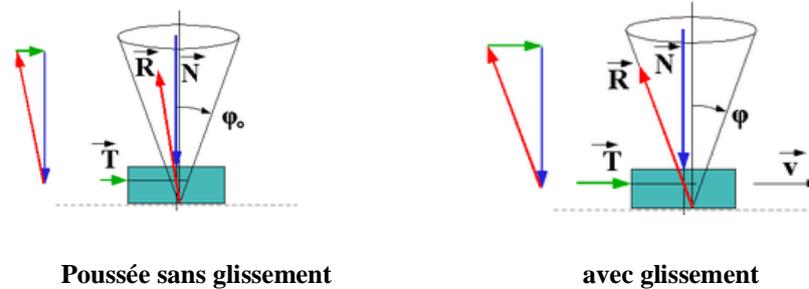


Figure I.22 : a) cône d'adhérence et b) cône de frottement.

La notion de coefficient de frottement implique donc, que l'on distingue deux cas de figure : le *frottement statique* qui est une interaction à la surface d'un corps qui empêche le glissement sur un autre corps. Son coefficient de frottement, noté fs ou μ_s , est associé à l'effort tangentiel nécessaire à créer la mise en mouvement. Ou bien le *frottement dynamique* qui dissipe de l'énergie mécanique en cas de glissement. Son coefficient de frottement, noté fd ou μ_d , est associé à l'effort tangentiel nécessaire pour entretenir le mouvement.

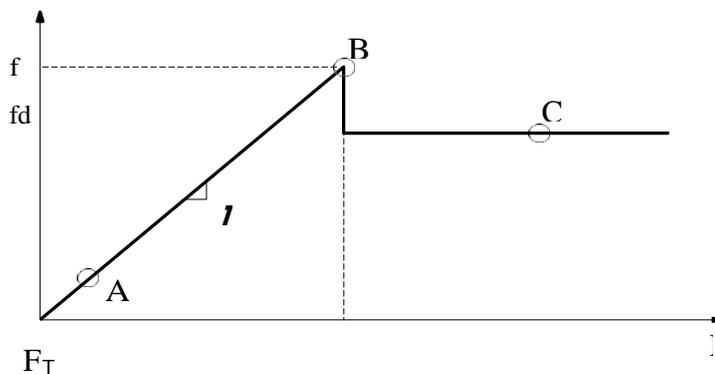


Figure I.23 : Evolution du coefficient de frottement selon la charge tangentielle.

Le patin est en état statique (zone A) tant que la force de frottement $T \leq fs.N$ (Fig. I.23). Dès que l'effort extérieur T atteint une amplitude suffisante pour rompre le contact (zone B), le patin passe en régime dynamique (zone C) et $T = fd.N = cste$. La transition statique-dynamique passe par une accommodation du contact qui assure un passage progressif entre les deux coefficients de frottement. Cette transition est très courte (quelques micromètres) devant les dimensions du contact (centimètre).

NB : Le coefficient f_s est appelé aussi facteur d'adhérence, c'est la limite supérieure du rapport des normes de l'effort tangentiel et de l'effort normal ce facteur caractérise la limite entre adhérence (système statique) et glissement (système dynamique).

L'origine du phénomène de frottement

Une analyse plus fine du frottement, constatée lors du passage d'aspérité sur une autre (Fig. I.24), permet de constater que celui-ci n'est pas un seul phénomène, mais un ensemble de plusieurs phénomènes mécaniques et chimiques dont les caractéristiques ne sont pas complètement mises en évidence à partir d'expériences isolées. Le frottement sec peut se partager en plusieurs forces :

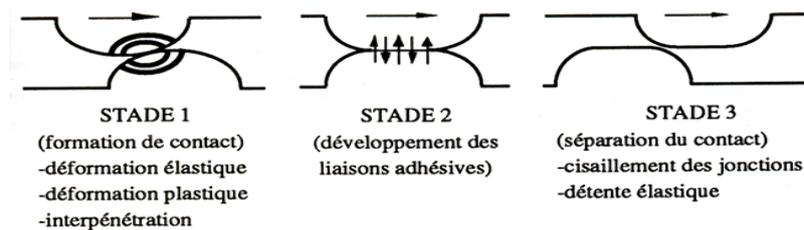
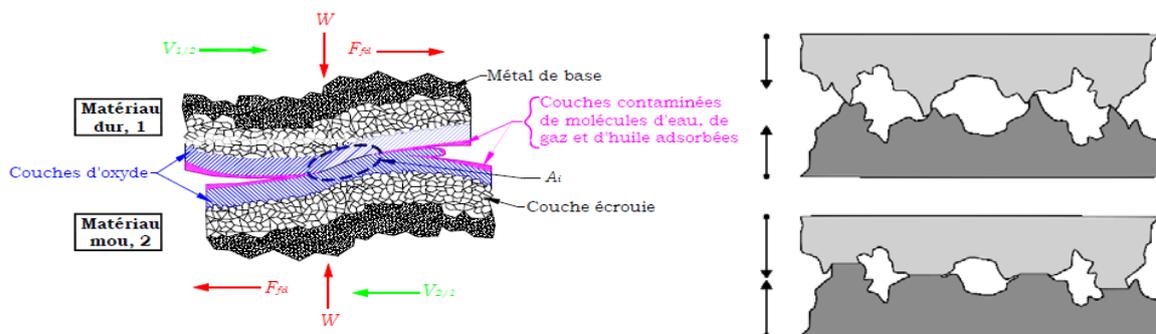


Figure I.24 : Etape du passage d'une aspérité sur une autre.

- **La déformation** : la déformation élastique et plastique des aspérités moins dures sous l'effet de charge.

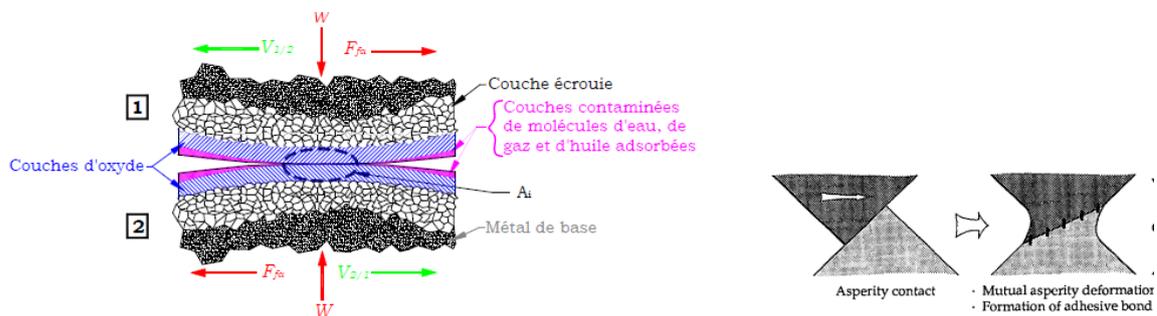


- **L'Adhérence** : les deux matériaux dont les surfaces sont absolument pures adhèrent l'un à l'autre, il faut une certaine force de traction pour les séparer. Il existe des liaisons appelées jonctions (jonctions adhésives) ; ces liaisons atomiques mettent en jeu une certaine énergie de surface. Lorsque les liens ainsi créés doivent être brisés, c'est cette énergie qui doit être apportée au minimum au système frottant. Si T est la force de frottement, τ la contrainte de cisaillement et τ_{max} la contrainte limite de cisaillement du matériau le plus tendre (la force par unité de surface nécessaire à cisailer les jonctions des contacts formés), alors :

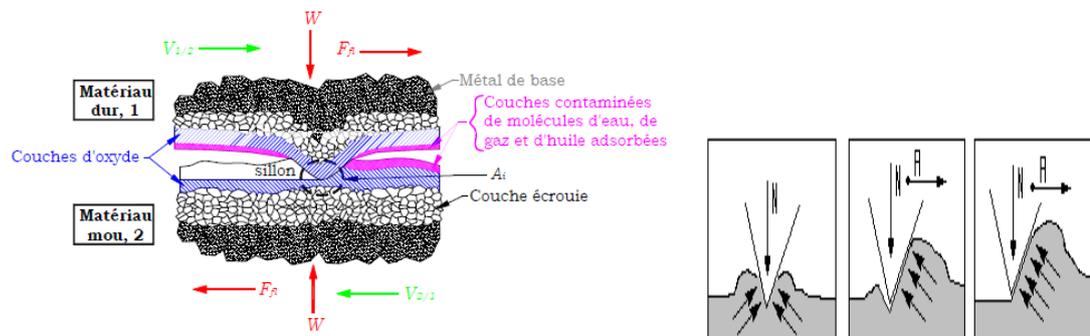
d'après l'équation **I.2**
$$T = A_r \cdot \tau_{max} = \frac{\tau_{max}}{\sigma_y} N \quad \text{I.6}$$

La force d'adhésion dépend des matériaux mis en contact. Le dépôt d'une fine couche d'un métal tendre (τ_{max} faible) sur un substrat dur (σ_y élevé) donnera lieu à une grande capacité à supporter les charges et une faible contrainte critique de cisaillement.

Etant donné que les surfaces sont toujours polluées par des oxydes, de la vapeur d'eau adsorbée et par des résidus, cette contamination empêche d'elle même l'adhérence ;



➤ **Le labourage** : un enfoncement statique d'aspérité dure dans un métal mou, au premier mouvement, il y a émergence de l'aspérité tout en déplaçant la matière. La force tangentielle appliquée a engendré un écoulement plastique supplémentaire (à l'origine du phénomène de bourrelet), ce qui provoque une augmentation de l'aire de contact par superposition des contraintes normales et tangentielles, cela conduit à la formation de rainure. La force de labourage est liée à la rugosité.



Les trois processus précédemment décrits permettent donc de considérer le frottement, principalement comme la somme de trois contributions :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{adh}} + \mathbf{F}_{\text{lab}} + \mathbf{F}_{\text{déf}} + \dots$$

\mathbf{F}_{adh} : dû aux phénomènes d'adhésion.

$\mathbf{F}_{\text{déf}}$: dû aux déformations élastiques et plastiques des aspérités.

\mathbf{F}_{lab} : dû au déplacement de matière par labourage.

En effet, des hypothèses concernant ces phénomènes ont été émises par de nombreux auteurs. La loi de Tabor (1987) traduit sous une autre forme les hypothèses formulées par Coulomb, et formule le coefficient de frottement par la somme de trois composantes (équation I.7) : une composante abrasive due au labourage de la surface par des aspérités plus dures, une composante due à l'adhésion, et une composante due au cisaillement des films constituant l'interface en glissement. Chacune de ces composantes concerne la surface réelle de contact, et est déterminée par les conditions de glissement : la vitesse relative entre les surfaces frottantes, la rugosité des surfaces qui gouverne l'aire réelle de contact, le régime de déformation plastique ou élastique des aspérités, et la pression supportée par l'interface. Ces composantes peuvent se produire simultanément ou

séquentiellement, l'additivité des contributions reste une hypothèse simplificatrice fréquemment utilisée pour la mise en équation du coefficient de frottement :

$$f = f_{adh} + f_{abr} + \alpha \quad \mathbf{I.7}$$

Où

- f_{adh} : décrit la contribution de l'adhésion en frottement, la force adhésive correspondante est proportionnelle à l'aire de contact,
- f_{abr} : est un terme relié au processus d'abrasion des surfaces frottantes par les aspérités ou des particules d'usure (labourage),
- α : correspond au cisaillement du film interfacial, et dépend du rapport de l'épaisseur du film sur sa longueur cisailée. La force tangentielle associée à cette composante augmente avec la pression de contact (déformation).

Le coefficient de frottement est révélateur de l'intensité de l'interaction entre les deux corps. En général une interaction forte entraîne systématiquement un échauffement accompagné d'une modification et d'une détérioration de l'état de surface d'au moins un des deux corps. Ceci entraîne une augmentation de l'usure et la défaillance de l'interface des deux corps.

De plus, le coefficient de frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs N , V et f , correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement :

$$P = T.V = f_d.N.V \quad \mathbf{I.8}$$

Réduire le coefficient de frottement permet d'une part, d'augmenter la durée de service des composants soumis aux contraintes mécaniques et d'autre part, de réduire la dissipation d'énergie. C'est un axe d'études scientifiques aux enjeux industriels importants.

Pour minimiser le frottement de glissement, il faut :

- Utiliser des matériaux incompatibles ou bien des films de surface à faible cisaillement tel que les films d'oxyde ou à faible résistance tel que le graphite. Ceux-ci permettent de réduire l'adhérence ;

- Utiliser des matériaux avec un grand module de rigidité ou obtenir des surfaces dures (traitements de surface) pour réduire le labourage ;
- Obtenir un état de surface optimale pour réduire la déformation plastique ; les surfaces lisses augmentent l'adhérence tout autant les surfaces rugueuses augmentent l'ancrage mécanique.
- Utiliser des éléments roulants de grand diamètre.

I.4.2 Force de frottement de roulement

Le roulement est associé au glissement à des échelles variables (sans adhérence il n'y a pas de roulement). Des micro-glissements apparaissent au niveau du contact (Figure I.25). Le frottement de roulement est défini par :

$$F_R = \frac{f_g \cdot a}{r} \cdot P_e$$

Avec : F_R force de frottement avec roulement, f_g coefficient de frottement par glissement, a rayon de l'ellipse de contact, r rayon du frotteur et P_e la pression de plastification du matériau.

Le facteur de frottement de roulement est : $f_R = f_g \cdot \frac{a}{r}$

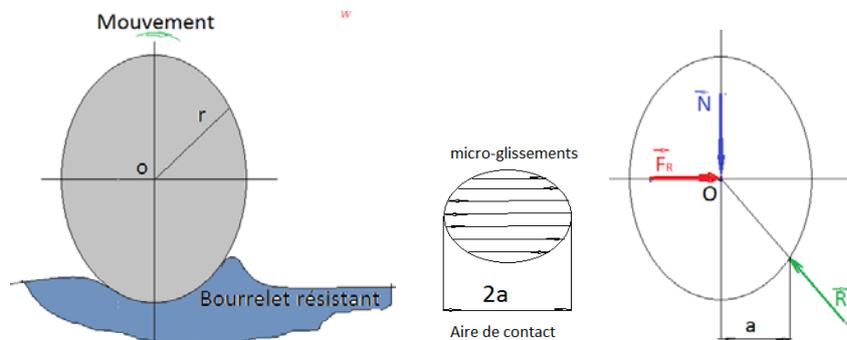


Figure I.25 : Frottement avec roulement.

Le frottement fait l'objet de nombreux modèles qui représentent plus ou moins fidèlement le processus physique étudié. En effet, les premiers travaux visant à modéliser le phénomène de frottement commencent au 18^{ième} siècle avec les travaux de Leonard de Vinci (1452-1519), puis sont approfondis à travers ceux d'Amontons (1699) et Coulomb (1780). Du fait des multiples configurations possibles, un cortège de modèles dérivées du modèle originel de Coulomb est développé dans la littérature. Toutefois, aucune loi n'est totalement juste (nécessité d'une correction) ; ces lois font apparaître des paramètres différents en fonction des besoins des utilisateurs. Il n'existe donc pas de loi généralisée pour décrire le frottement, mais un catalogue de fonctions représentatives d'un système tribologique (Figure I.26) à un instant donné.

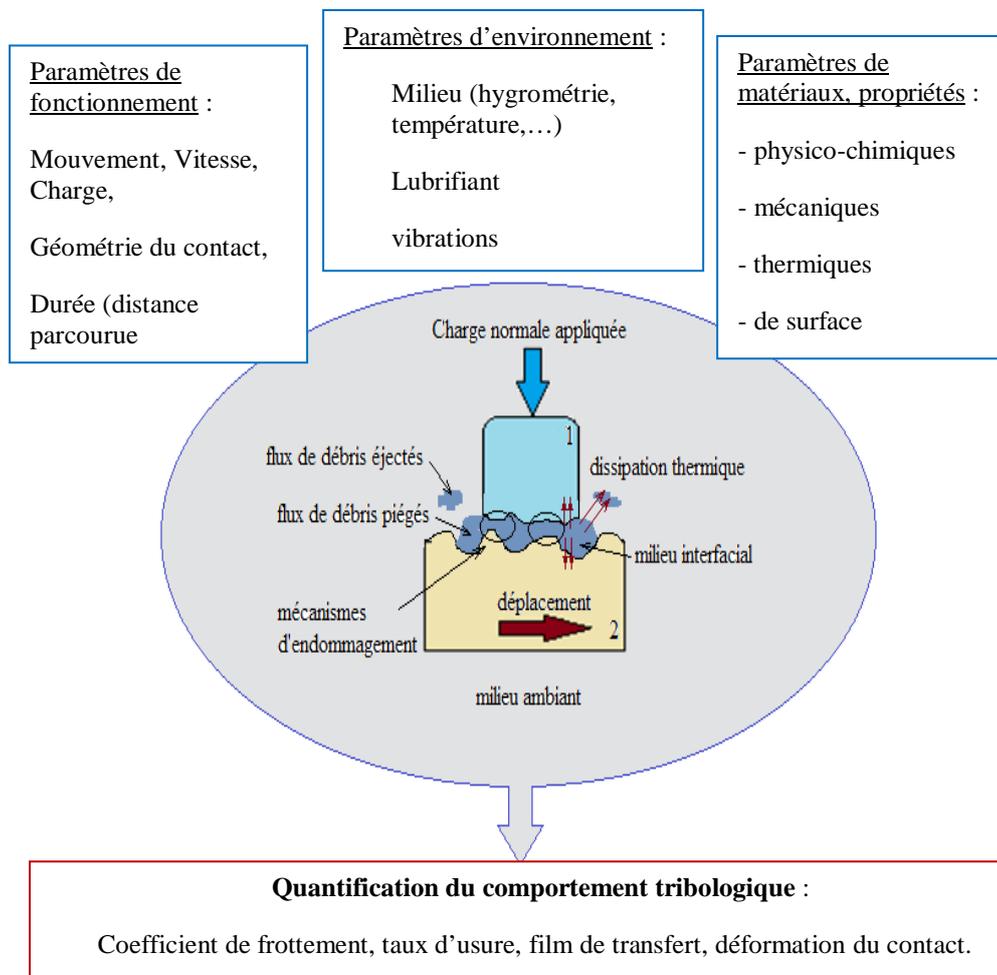


Figure I.26: Représentation schématique d'un système tribologique.

La résolution des problèmes de frottement et d'usure repose aujourd'hui essentiellement sur un certain nombre de « règles de l'art » issues de lois construites le plus souvent sur la base de retours d'expériences. Ces informations restent des indicateurs qui permettent le choix de solutions, en effet, la technologie du frottement est très complexe, il est possible de tomber sur des contradictions dès lors que sont pris en compte plusieurs paramètres. Le choix entre les solutions possibles devra être réalisé en identifiant les paramètres prépondérants pour la situation de frottement concernée à partir de l'analyse du système tribologique. Cette situation très courante justifie la place importante de l'expérimentation en tribologie, qui constitue un moyen souvent incontournable de sélection et choix définitifs des solutions

I.4.3 Influence des paramètres intrinsèques et extrinsèques sur le frottement

Le coefficient de frottement f (ou μ) n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux en contact. Il est fonction de tout le système tribologique et de son histoire ; sa valeur dépend de plusieurs paramètres : des propriétés des matériaux, des paramètres mécaniques, des conditions chimiques dans le contact. De plus, la formation de particules d'usure dans l'interface, le changement de la rugosité par déformation plastiques des aspérités et le durcissement par écrouissage du métal près de la surface, ont également un impact prépondérant sur sa valeur.

Phénomènes physico-chimiques

Les surfaces peuvent être le siège de tous les types possibles de réactions ou d'interactions. Elles sont soumises à des phénomènes d'adsorption, d'oxydation ; dès leur exposition à l'atmosphère, elles se recouvrent de film d'oxyde et/ou d'hydroxyde dont l'épaisseur est de quelques nanomètres, suivant les métaux, avec adsorption de molécules contenues dans l'environnement. Ces différents types de réactions peuvent modifier très largement l'énergie de surface (influe sur les phénomènes de transfert).

Phénomènes thermiques

Le frottement entraîne une dissipation importante d'énergie sous forme de chaleur qui, si elle reste concentrée dans la zone de contact, peut engendrer une modification des caractéristiques du matériau (transformations de phases dans une zone adjacente à la surface de contact) et être la cause de dégradation de surface.

Usures

II.1 Introduction

L'usure est souvent définie par la « perte progressive de matière de la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface ». D'un point de vue plus pratique, l'usure s'applique à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou systèmes ; c'est un phénomène et non une grandeur physique. Elle résulte d'un ensemble complexe de mécanismes qui sont souvent difficiles à interpréter. Son occurrence conduit inévitablement à des pertes de côtes et de formes, qui affecte le bon fonctionnement des pièces en service. La dégradation de la précision par perte de côte ou bien le blocage dû à l'accumulation de débris et l'altération des propriétés mécaniques des composants suite à la dégradation des surfaces (rayures, sillons, cavités) sont des dysfonctionnements causés par le frottement des systèmes tribologique.

L'usure se rencontre plus particulièrement sur toutes les machines dont les fonctions utilisent les actions de contact : transmission des forces ou mouvements entre les différentes parties constitutives, guidages en rotation ou translation, assemblages, étanchéités etc. A cause de l'usure, beaucoup de machines et équipements sont remplacés, le plus souvent, avec d'énormes dépenses. Les pertes occasionnées par l'usure dans l'industrie mondiale s'élèvent annuellement à plusieurs millions de tonnes de métaux.

Comme cité précédemment, l'analyse scientifique du comportement tribologique fait appel à différents domaines. Parmi ces domaines les matériaux, les surfaces et les écoulements de la matière. Le comportement des matériaux apparaît donc comme un élément essentiel ; selon leur ductilité ou leur fragilité, la nature de leur contact diffère énormément, et les lois de frottement et d'usure qui en découlent varient aussi.

II.2 Dégradation des surfaces

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec une perte de masse, de côtes ou de formes, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément. Dans les premiers instants du frottement (rodage), ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient en fonction des multiples conditions présentes.

Une classification des types d'usure a été donnée par Stachowiak en 1993, où on distingue l'usure due à l'action d'une particule sur la surface d'un solide (usure par abrasion, érosion ou cavitation), l'usure due au passage répété d'un solide sur une surface (usure par fatigue), et l'usure due aux forces d'attraction entre les atomes de deux surfaces (usure adhésive). Viennent ensuite des types d'usure plus spécifiques, comme l'usure corrosive et l'usure par petits débattements (fretting). Meng et Ludema en 1995, citent plus d'une centaine de lois d'usure, dont une grande partie est basée sur la loi d'Archard, qui relie la vitesse d'usure, la vitesse de glissement et les caractéristiques mécaniques des corps en contact.

Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces

D'une manière générale, on appelle *usure* la détérioration d'une surface solide. Elle est caractérisée par la dégradation des corps et/ou la perte matérielle à leur surface provoquée par le frottement de deux solides en contact (usure mécanique), mais aussi par réaction chimique, ou autres phénomènes. Elle est fonction des propriétés du matériau, des conditions ambiantes et opératoires ainsi que de la géométrie des corps.

Sous l'effet des sollicitations tribologiques, une surface subit des *modifications et endommagements*, dont les principales formes sont schématisées sur la figure suivante :

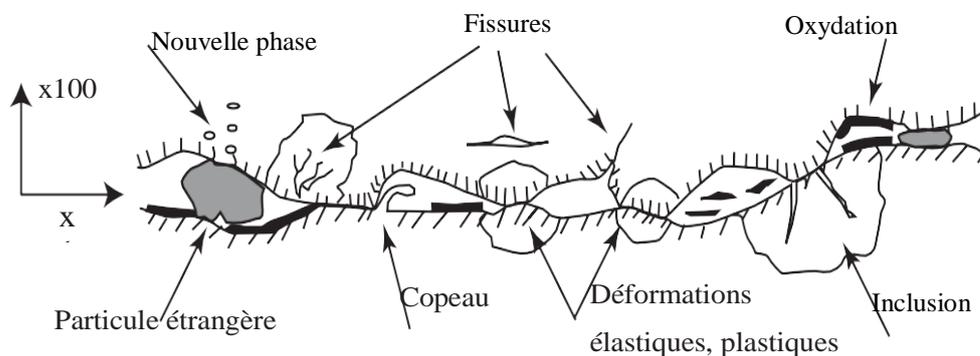


Figure II.1: Coupe schématisée de l'interface en tribologie. Les modes de destructions de surface

II.3 Formes d'usures

Le processus d'usure est tout comme la force de frottement, un phénomène assez mal décrit théoriquement. Ce processus dépend des conditions environnementales et varie dans le temps selon la vitesse des réactions physico-chimiques, mais aussi de l'évolution de la rugosité de surface qui dicte la géométrie et les pressions au niveau des microcontacts. Les surfaces métalliques, soumises à un frottement solide ou fluide en présence ou non de lubrifiants, peuvent être affectées par des formes d'usures qui peuvent aller de l'usure douce régulière et contrôlable (usure normale) à la détérioration brutale entraînant la mise hors service du mécanisme.

Les détériorations des surfaces sont dues à des phénomènes isolés ou simultanés, classés en quatre formes fondamentales : adhésive, abrasive, corrosive et par fatigue auxquelles s'ajoutent des formes plus complexes comme la corrosion de contact, l'érosion par cavitation.

II.3.1 Usure adhésive

L'usure adhésive (Figure II.2) entre deux corps en contact est la forme la plus fondamentale de détérioration des surfaces. Elle est due à la rupture par cisaillement, lors du frottement, des microsoudures ou jonctions formées instantanément entre les aspérités antagonistes des deux surfaces. Ces liens résultent de forces inter faciales allant des attractions purement électrostatiques (entre charges électriques opposées) jusqu'aux liaisons de nature mécanique, chimique ou métallurgique. L'adhésion dépend du degré d'imbrication des surfaces en contact (conditions du contact et rapprochement plus ou moins élevé) ainsi que de la nature et de la composition des matériaux en contact. La force de frottement doit cisailer le plan le plus faible afin de permettre le mouvement.

La formation de soudures très localisées (Figure II.3) est favorisée également par l'énergie thermique dissipée par frottement associée à de très fortes pressions de contact.

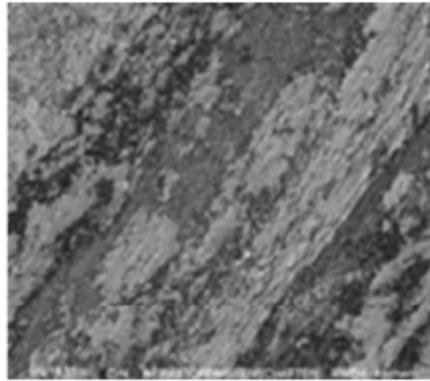


Figure II.2 : Usure adhésive

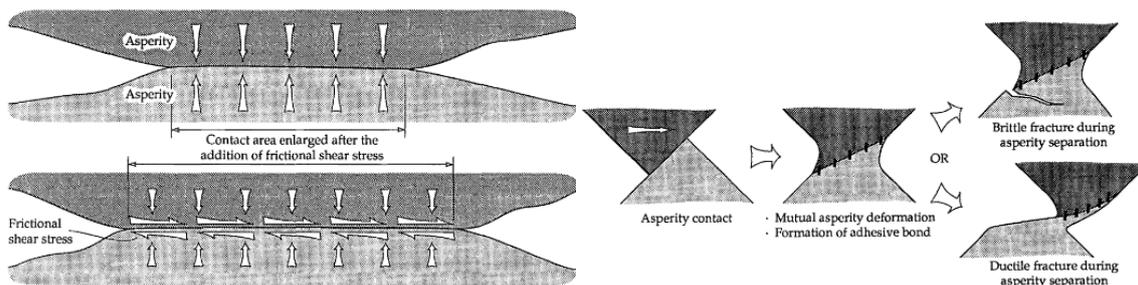


Figure II.3 : Schématisation du mécanisme de l'usure adhésive (stachowiak1993)

Selon sa nature, la soudure sera une véritable soudure métallurgique ou « soudure chaude », appelée aussi soudure franche, ou une simple liaison d'adhésion physique ou « soudure froide » ; par conséquent, selon la résistance au cisaillement de la jonction, la rupture se produit à l'intérieur du métal le plus tendre si la résistance au cisaillement des soudures est supérieure à la résistance au cisaillement du métal le plus tendre avec un important transfert adhésif et une usure sévère, c'est la rupture cohésive ou, au contraire, au niveau de la jonction si la résistance au cisaillement de la jonction est inférieure à celles des deux métaux (exemples : aluminium/acier, étain/acier), c'est une rupture adhésive. La détérioration prend donc plusieurs formes allant du rayage sévère ou écaillage (en Anglais scuffing) au rayage léger ou usure adhésive douce. D'autre part l'usure par adhésion étant toujours accompagnée d'un échauffement au moins local de la surface, elle s'accompagnera d'une coloration brune à bleue sombre.

Sur la figure II.4 est représenté le mécanisme de transfert de particule libérée à l'interface.

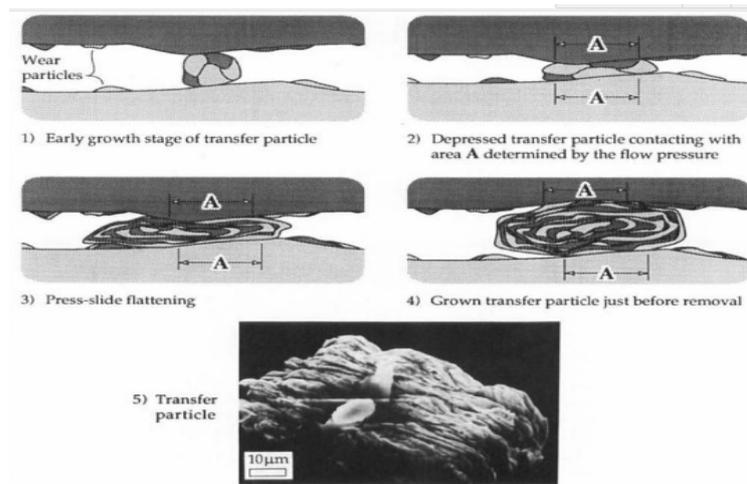


Figure II.4 : Transfert de la matière. Stachowiak

L'usure adhésive se caractérise généralement par un fort taux d'usure et un coefficient de frottement instable. Les particules d'usure créées ont une distribution de taille assez large et sont souvent transférées sur l'un des solides en contact (Figure II.4).

Selon l'étude de **Jean-François MOLINARI** sur l'usure adhésive, le détachement d'une particule de débris est le résultat d'une fissure souterraine, qui est influencée par le champ de contraintes modifié. En étendant leur configuration de simulation à deux jonctions (Figure II.5) et en rapprochant les aspérités en contact, ils ont pu observer que le mécanisme de détachement se manifestait de la manière suivante : les mécanismes d'aspérités uniques, soit lissage plastique (Figure II.5(a)), soit formation de débris (Figure II.5(b)) sont remplacés par des fissures souterraines profondes collectives qui conduisent au détachement d'une seule et grosse particule de débris (Figure II.5(c)).

Quelle que soit l'origine de l'adhésion, la rupture cohésive conduit à un transfert du matériau le plus mou sur le substrat le plus dur. Ce transfert peut dégénérer en usure adhésive voire en grippage généralisé dans le cas où le matériau transféré est métallique.

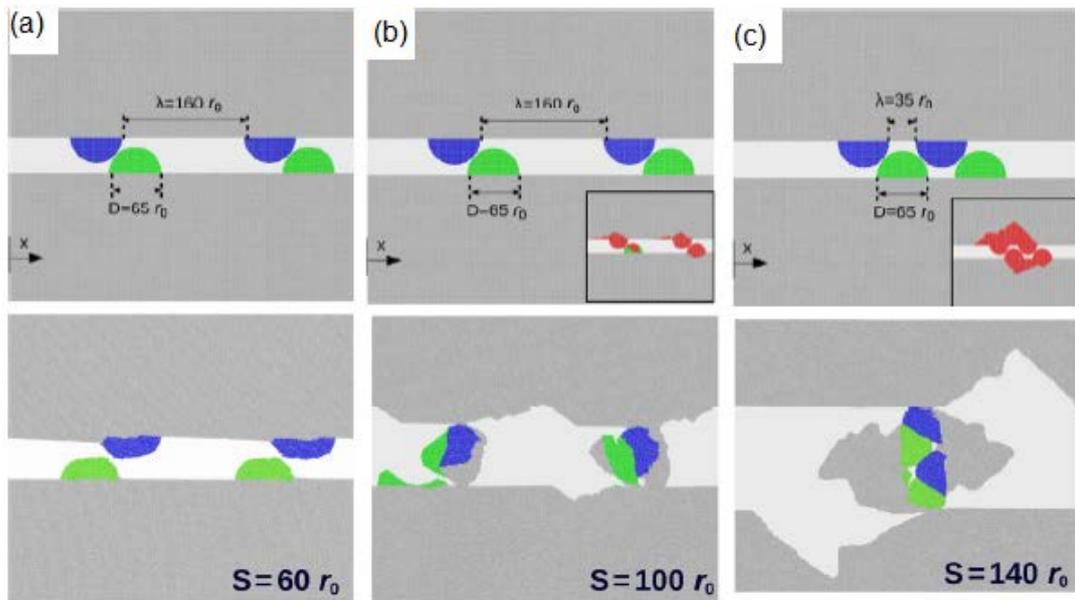


Figure II.5 : Modélisation du processus de déformation et de détachement d'une particule de débris en fonction de la taille des aspérités a) inférieure à la taille critique, b) supérieure la taille critique et c) selon la distance séparant les aspérités. Selon J.F. MOLINARI

Le Grippage (*scoring, scuffing*) : c'est un enlèvement ou un déplacement brutal de matière provoqué par la rupture de jonctions locales entre les peaux des massifs, soudées par les effets thermiques. Une surface grippée est caractérisée par des rayures, des sillons dans la direction de la vitesse de glissement (Figure II.6). Des transferts de matière d'un massif à l'autre sont fréquents. Les grippages se produisent brutalement. Ils sont associés à des vibrations, à une augmentation importante de l'énergie dissipée dans le contact et de la température superficielle des massifs. La physico-chimie du lubrifiant et de la peau des massifs est un facteur important. La dégradation de la micro-géométrie des surfaces qui découle du grippage est à l'origine d'usure sévère.

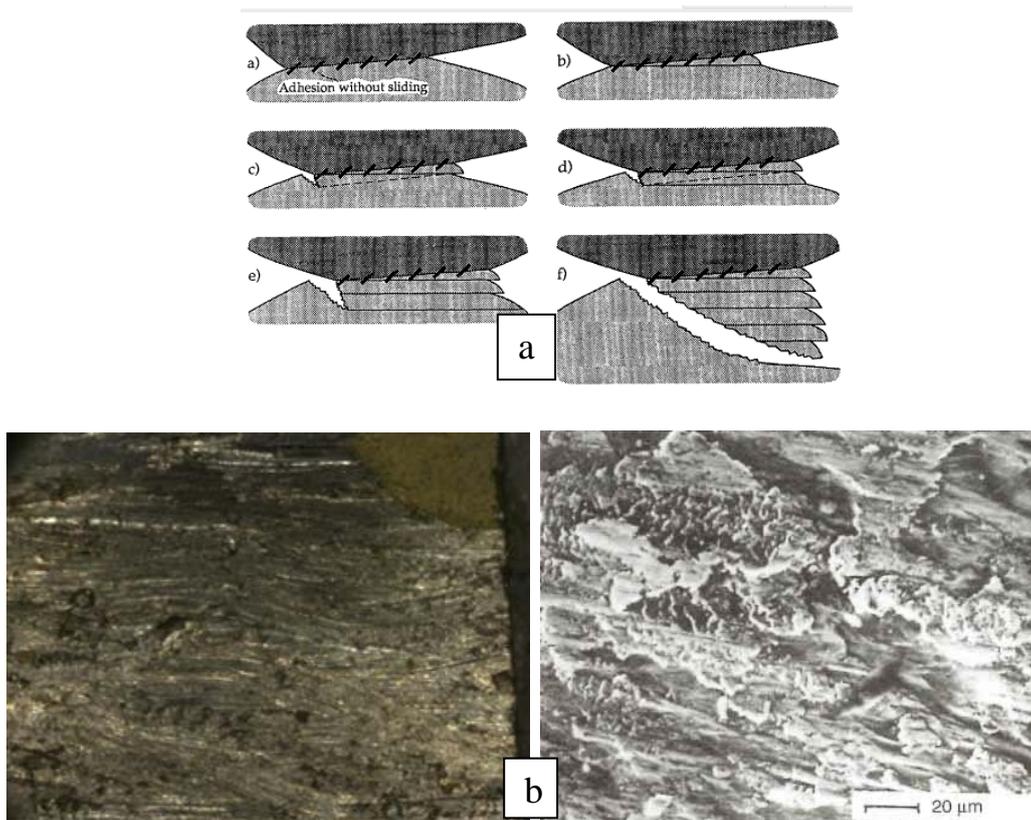


Figure II.6 : a) Mécanisme de formation de l'usure sévère, le grippage. b) Micrographies représentant le phénomène de grippage (scuffing) sur une bague de roulement.

Sur la figure suivante (Figure II.7) sont représentés des pièces mécaniques soumises à l'usure adhésive :



Figure II.7 : Photos représentant des pièces mécaniques ayant subies l'usure adhésive.

- Usure du chemin de roulement d'une bague intérieure d'un roulement, des traces brunes suspectes bien visibles sur la bague intérieure annonçant le début de grippage ;
- Traces d'usure du tourillon. À gauche, on trouve des stries continues dues à un phénomène d'abrasion. À droite, les stries sont beaucoup plus chaotiques, avec des traces d'arrachements caractéristiques de l'usure adhésive ;
- Le grippage d'un pignon endommagé, les arrachements visibles des dents.

L'usure adhésive est surtout observée dans le cas de contact sec ou de lubrification insuffisante (mixte ou limite). L'adhésion est élevée lorsque le contact entre deux solides est suffisant avec un certain taux de déformation plastique des aspérités. Elle peut être minimisée par la réduction de l'échauffement à l'interface, en limitant les conditions d'utilisation. Toutefois, le choix des matériaux utilisés joue à son tour un grand rôle dans le degré d'usure, où il est préférable d'utiliser des couples de matériaux compatibles tribologiquement possédant de faibles interactions (une faible énergie d'adhésion), Une forte dureté et un module de Young élevé permettent également de réduire l'adhésion.

II.3.2 Usure abrasive

L'usure abrasive est une usure mécanique due au contact de corps (aspérité ou particules) durs et d'une surface. Ces corps durs peuvent dégrader les surfaces selon différents mécanismes et la sévérité de la détérioration est fonction des propriétés et de la géométrie des matériaux en contact ; on peut observer deux principaux phénomènes (Figure II.8) :

- un enlèvement de matière de la surface par coupe (a) ou par rupture de grain (cas des céramiques) (d) ;
- une déformation plastique de la surface (labourage) sans ablation de la matière (c).

Un mécanisme de fracturation peut se produire lors du frottement, surtout si l'un des matériaux en frottement est fragile (b).

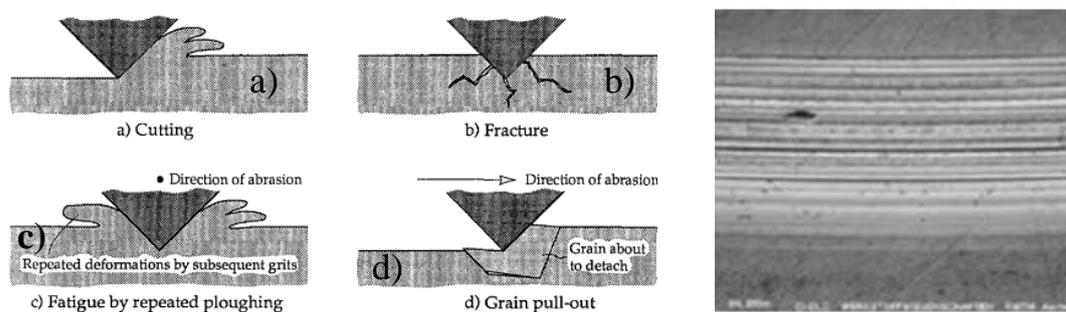


Figure II.8 : Illustration des mécanismes de l'usure par abrasion (a) par coupe, (b) par rupture, (c) par labourage, (d) par rupture (délamination) et micrographie de l'état de surface après abrasion.

Le faciès d'usure est constitué de stries parallèles à la direction de glissement (e). Des sillons sont clairement représentés, s'étendant parallèlement à la direction de coulissement indiquant que l'échantillon a subi une forte usure abrasive.

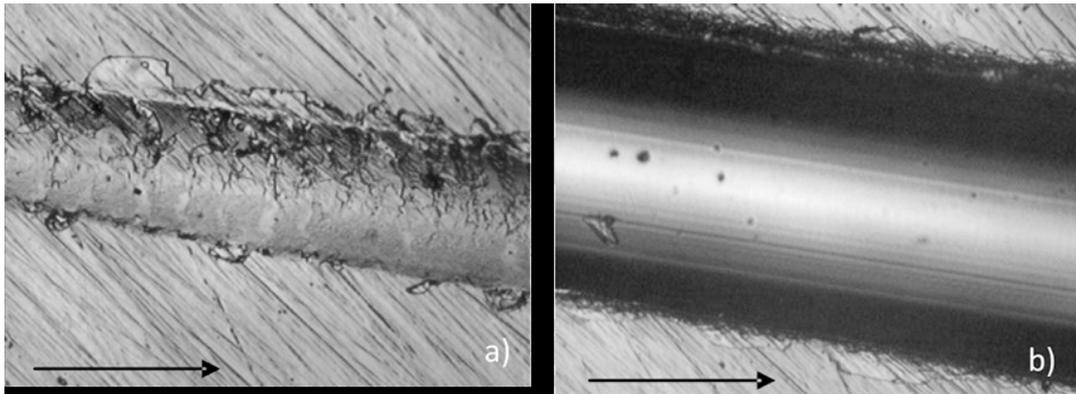
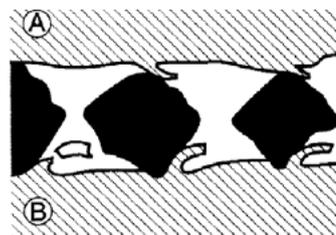
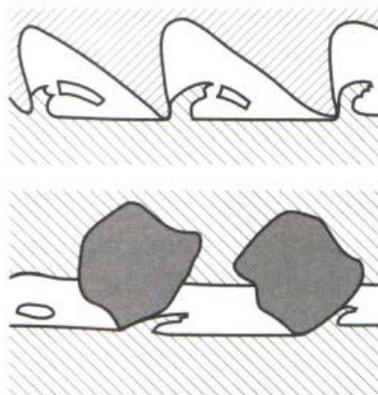


Figure II.9: Micrographie d'une strie issue de l'action abrasive d'un matériau a) fragile et b) ductile. (Maryory Astrid Gómez Botero, Mechanical properties and tribological behaviour of crn/tin multilayer coatings)

On distingue deux types d'abrasion :

- **l'abrasion à deux corps**, provoquée par des aspérités (pic de rugosité) dures ou des particules dures incrustées dans l'une des surfaces qui leur impose sa cinématique et usant la surface moins dure ;
- **l'abrasion à trois corps**, engendrée par des particules abrasives (troisième corps) plus dures que les surfaces et piégées dans l'interface avec une cinématique différente des deux surfaces provoquant ainsi l'usure dans le contact.

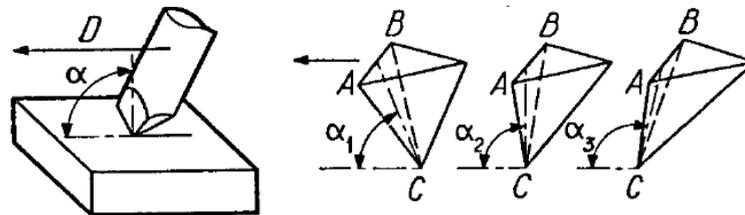


$$HV_A \approx HV_B$$

On observe sur les illustrations suivantes (Figures. II.10 et 11) le comportement abrasif des particules et l'influence de la nature des particules abrasives sur les surfaces.

Dans le cas des surfaces ductiles (métalliques), le comportement des particules abrasives change :

➤ selon la géométrie de l'angle d'attaque de la particule :



- les particules abrasives coupent si elles sont suffisamment aiguës (Figures. II.10 (a)) avec un angle d'attaque élevé,
- sinon elles repoussent la matière en surface (labourage) (Figures. II.10 (b)) pour des angles d'attaque plus faibles.

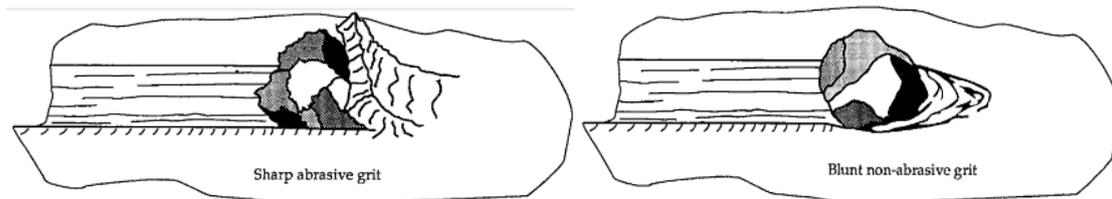


Figure II.10 : Diminution de l'effet abrasif par élimination des arêtes tranchantes des particules abrasives. Stachowiak

➤ Selon la nature des particules abrasives, on observe :

- Si les particules abrasives sont fragiles, elles ont tendance à se fracturer pour obtenir des particules de dimension plus petites que l'interface (Figures. II.11 (a));
- si les particules abrasives sont moyennement fragile, elles vont subir une élimination partielle des arêtes tranchantes (Figures. II.11 (b)) ;
- si les particules abrasives sont ductiles, elles vont subir un polissage avec élimination des arêtes tranchantes (Figures. II.11 (c)).

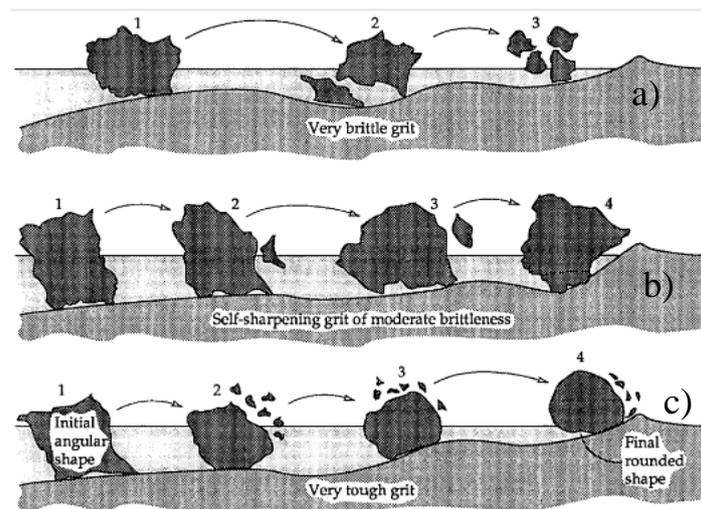


Figure II.11 : Influence du matériau (ductile/fragile) sur l'effet d'abrasion.

Sur la figure suivante (Figure II.12) est représentée la résistance à l'usure abrasive de différents matériaux (ductiles à fragile ou dures) en fonction de la dureté du matériau.

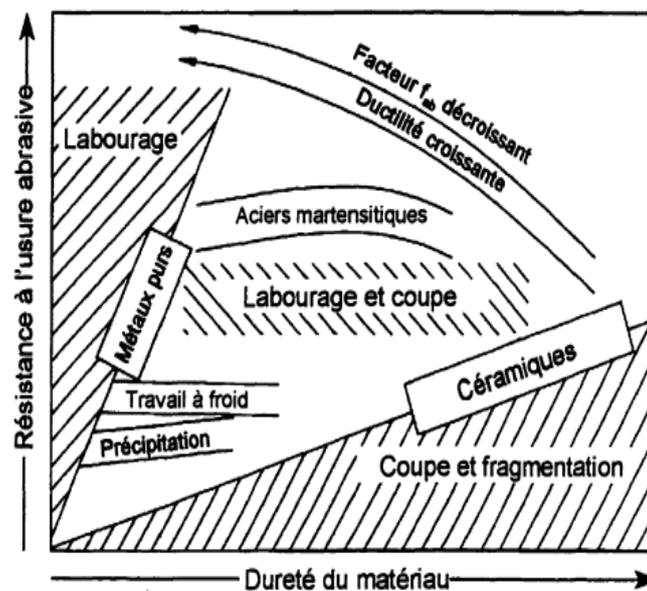


Figure II.12 : Représentation schématique de la résistance à l'usure abrasive de différents matériaux en fonction de la dureté.

Sur la figure suivante (Figure II.13) sont représentées des pièces mécaniques soumises à l'usure abrasive :



Figure II.13 : Photos représentant des pièces usées par abrasion.

- a) Un tourillon sur lequel on peut constater l'allure typique des stries d'abrasion ;
- b) Une usure abrasive à trois corps sévère est observée. Elle s'est produite au niveau d'un joint d'étanchéité qui a provoqué un point d'accumulation de débris abrasifs ;
- c) Dentures usées sur cet arbre pignon. Elles ont subi l'usure abrasive.

L'abrasion en présence de lubrifiant

On remarque que l'abrasion en présence de lubrifiant dépend des dimensions des particules présentes. Si la dimension des particules est de l'ordre de grandeur des épaisseurs du film d'huile, l'abrasion est normale avec des rayures et sillons d'usinage de coupe. Par contre, si la dimension de ces particules est petite, l'aspect de la détérioration dépend de l'angle d'incidence des particules par rapport à la surface, nous sommes en présence d'érosion abrasive.

Ce type d'usure est donc affecté par l'épaisseur du film d'huile, la pollution du lubrifiant, la dimension et les formes des particules abrasives, ainsi que la rugosité des surfaces en contact.

La résistance à l'usure abrasive dépend de la dimension du grain abrasif et de sa forme, de la charge appliquée, de la vitesse de glissement et de la structure du métal. Généralement l'abrasion est réduite en augmentant la dureté superficielle de la matière sur une profondeur importante ; pour cela, des traitements thermiques de surface sont souhaités. On préconise de donner une dureté maximale à la pièce qui est en mouvement devant la zone de contact et une dureté plus tendre pour l'autre pour pouvoir absorber les particules abrasives la rendant inopérantes.

II.3.3 La fatigue de contact

Lors du contact d'aspérités solides avec la surface antagoniste, de très fortes contraintes locales apparaissent. Si celles-ci sont associées à des mouvements répétitifs, elles peuvent provoquer l'apparition et la propagation de fissures dites de fatigue. C'est fissures se traduisent à terme par la délamination de la matière.

Les détériorations de surface provoquées par la fatigue de contact prennent divers aspects en fonction du mode de sollicitation et du stade d'évolution de la dégradation.

Quatre modes de sollicitations sont à retenir selon les mouvements relatifs des surfaces en contact, illustrés sur les schémas ci-dessous, figure II.14. Ceux-ci sont rencontrés dans les roulements à billes ou à rouleaux, les engrenages ou encore les systèmes de transmission à came, à chaînes, etc.

Dans un système sollicité en roulement, glissement, ou les deux combinés, les contraintes de cisaillement maximales déterminent, selon leur localisation, le site d'amorçage de la dégradation (selon la théorie de HERTZ).

Par exemple (Figure 15), l'amorçage de fissure de fatigue à partir d'un point faible de la surface peut lui permettre de se propager le long de plans de glissement. La propagation de ces fissures et leur rencontre entre elles ou avec une fissure préexistante sous la surface crée les particules d'usure. De la fissuration en sous couche peut également se former, les surfaces peuvent apparaître non usées alors que des mécanismes de fissurations sont en cours en sous couche (Figures II. 16 et 17).

La fissuration peut trouver son origine sur des impuretés ou des défauts présents sur la surface.

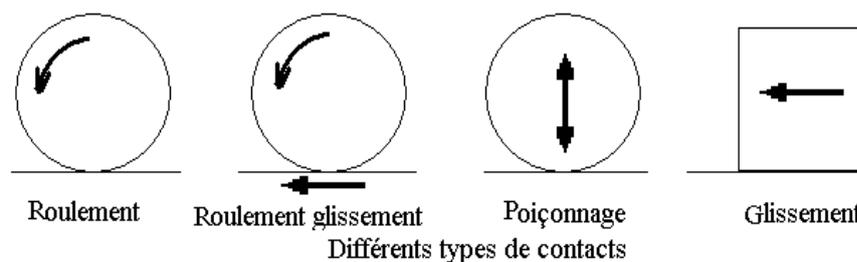


Figure II.14 : Représentation des modes de sollicitations selon les mouvements relatifs des surfaces en contact.

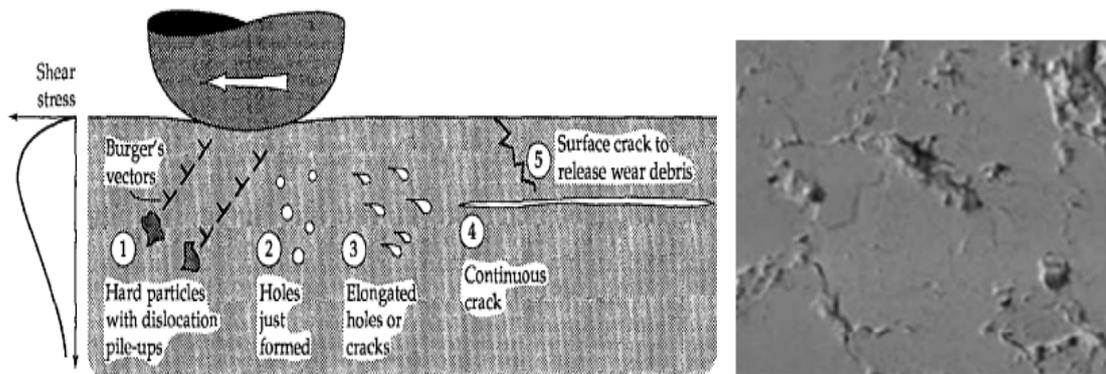


Figure II.15 : Mécanismes de la fatigue et micrographie d'une surface usée par fatigue.

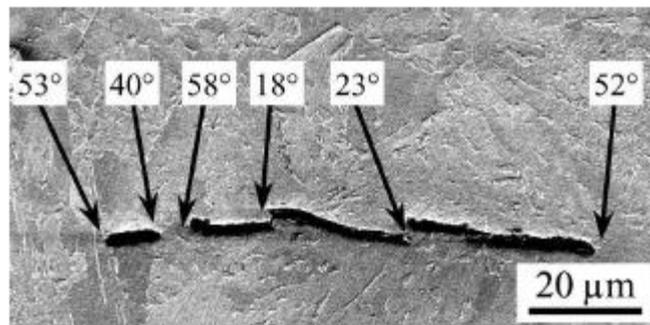


Figure II.16 : Rupture « fragile » par clivage (métaux) coupes.

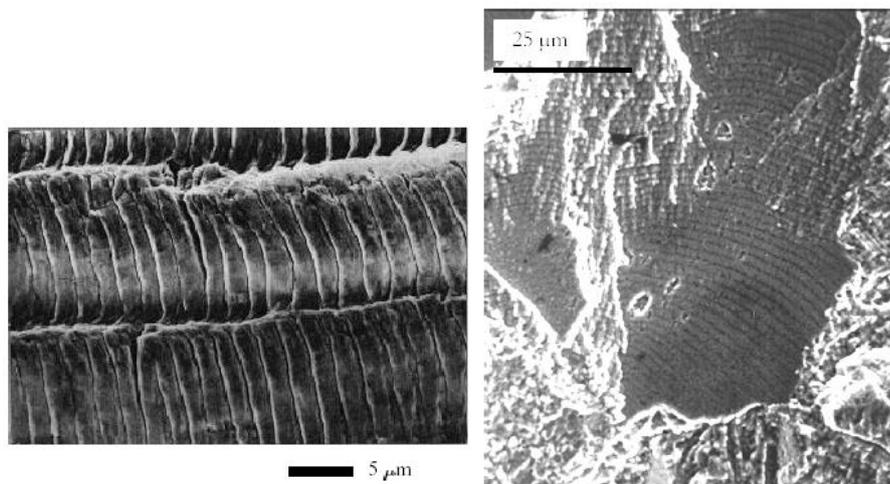


Figure II.17 Propagation lente d'une fissure, cycle par cycle déformation plastique cyclique : stries

II.3.3.1 Ecaillage

Quand les contraintes de cisaillement maximales sont voisines de la surface, le premier état de la détérioration consiste en une piqûre (ou pitting) qui se présente comme un petit trou ou un puits peu profond (de 10 à 20 μm) amorcé sur des altérations superficielles d'origines géométriques ou métallurgiques. Dans certains cas ces piqûres (micro-écailles) se stabilisent et disparaissent par rodage. Dans d'autre cas elles se généralisent en surface et par suite deviennent destructives ; c'est le « pitting généralisé » ou « peeling ». Elles peuvent évoluer vers une fissure plus importante pénétrant dans le matériau et remontant vers la surface pour y déboucher perpendiculairement et provoquer l'élimination de la languette métallique, il y a écaillage (ou spalling) (Figure II.18).

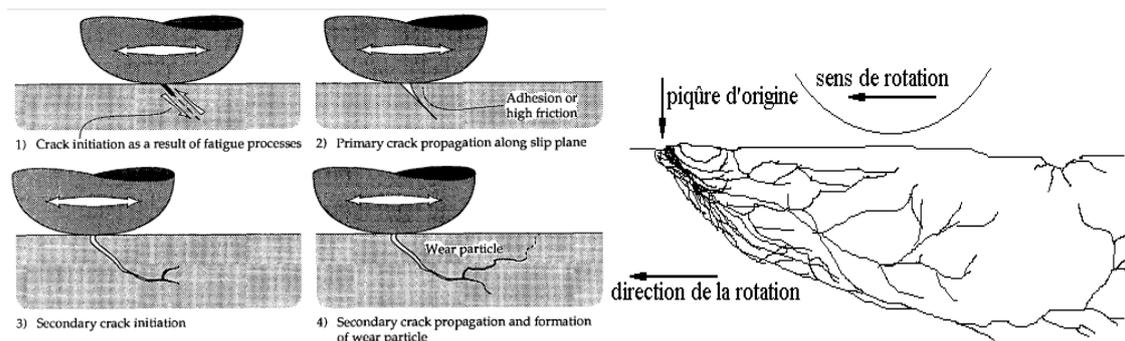


Figure II.18: Représentation du phénomène d'écaillage

Dans le cas du poinçonnage les dégradations observables ressemblent à celles du roulement pur ; écaillage d'origine profonde ou piqûre superficielle en cas de forte rugosité ou de mauvaise lubrification. L'écaillage se présente sous deux formes :

Écailles (*spalls, large pits*) : ce sont des cavités de dimensions analogues à la largeur de la zone de contact et dont les bords sont abrupts. Typiquement, elles ont quelques millimètres carrés de surface et quelques dixièmes de millimètre de profondeur (Figure II.19 (a)). Elles sont à l'échelle du contact hertzien classique. Elles surviennent généralement dans des contacts très chargés. Elles résultent de la répétition cyclique des contraintes dans la sous-couche du massif. Elles apparaissent après une période d'incubation importante, de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de cycles. Elles sont précédées et associées à un réseau de fissures à la même profondeur et, fréquemment, à la prolifération des micro-écailles. Ce sont des dégradations classiques dans les roulements et dans les engrenages.

Microécailles (*micropits, pits*) : ce sont des cavités beaucoup plus petites que les précédentes (Figure II.19 (b)). Elles ont des dimensions dix à vingt fois plus faibles que la largeur du contact, quelques dixièmes de millimètre d'envergure et quelques centièmes de millimètre de profondeur. Ces dimensions sont à l'échelle des aspérités des surfaces. Ces avaries surviennent même dans des contacts peu chargés. Elles sont dues à la répétition cyclique des contraintes dans la *peau* des massifs, notamment aux sollicitations des aspérités des surfaces auxquelles elles sont directement associées. Leur période d'incubation est plus courte que pour les écailles, de l'ordre de quelques millions de cycles. Elles sont dangereuses, car elles détruisent la micro-géométrie des surfaces, elles accélèrent la formation des écailles et peuvent être à l'origine de fissuration en volume.

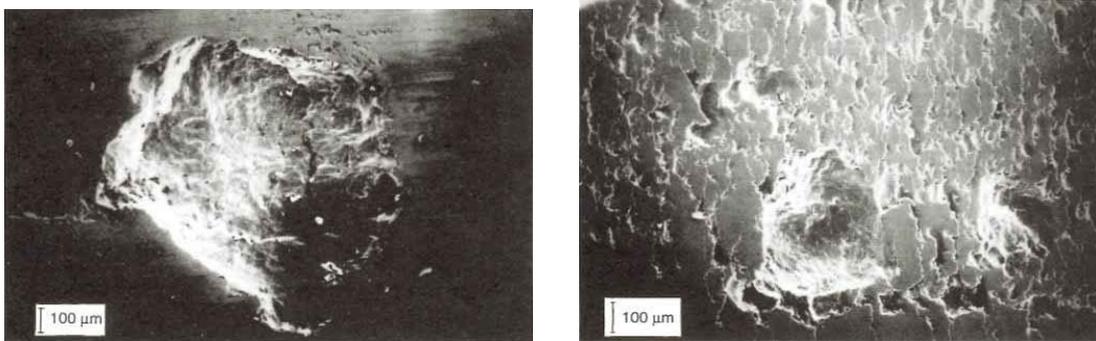


Figure II.19: Micrographies a) d'une écaille et b) de microécailles (Doc. SNR)

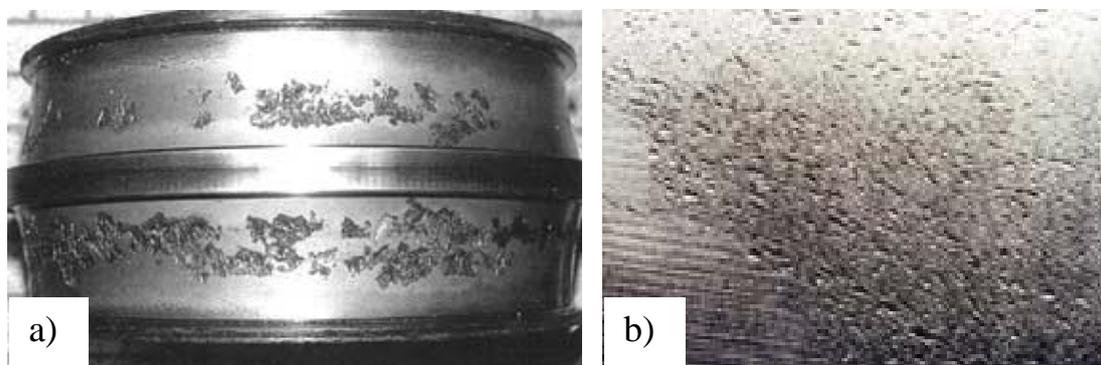


Figure II.20 Exemple du phénomène d'écailage a) sur une bague intérieure de roulement et b) sur la surface d'un pignon

II.3.3.2 Usure par délamination

L'usure par délamination (Figure II.21), comporte une succession de processus :

- Transmission de forces par adhérence et labourage,
- Déformation en sous couches,
- Formation de fissures,
- Propagation de ces fissures,
- Séparation d'une particule d'usure.

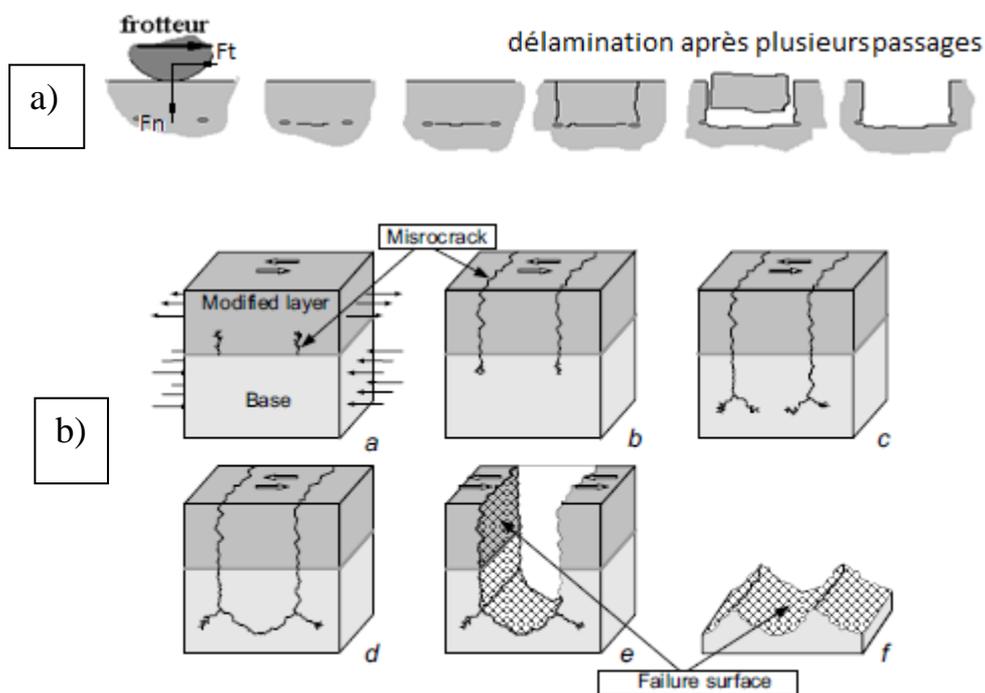
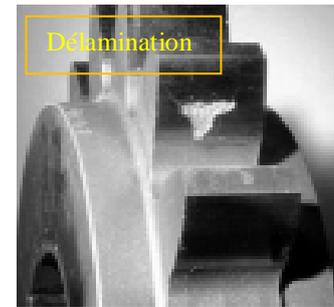


Figure II.21 : a) Schéma du mécanisme de délamination et b) exemple de délamination d'une surface traitée superficiellement.

Exemple : sur la figure II.21 (b), on peut observer que le traitement de surface appliqué à un acier austénitique (08KH18N10T traité superficiellement) n'apporte pas une augmentation essentielle de la résistance à l'usure des matériaux lors de l'interaction en friction à sec sous chargement cyclique. La raison en est la différence entre les déformations de la couche superficielle traitée (déformation élastique) et du substrat (déformation plastique) qui provoque la formation de défauts dans le substrat et de contraintes de traction dans la couche superficielle conduisant à une nucléation dans la couche superficielle et sur les limites des couches. Des microfissures s'étendent dans la couche superficielle et dans les couches du substrat.

II.3.3.3 Usures et fissurations par petits débattements (*fretting wear*)

Il s'agit d'une usure induite par petits débattements de l'ordre du micromètre jusqu'à une centaine de micromètres. Cette dégradation apparaît dans les contacts secs. Des contraintes importantes dans les massifs sont à l'origine de l'amorçage et de la propagation de fissures. Si, un matelas de particules sépare ces surfaces, tout en transmettant les efforts normaux, ce troisième corps accommodera les vitesses relatives. L'usure sera alors gouvernée par trois phénomènes : le piégeage, l'élimination et le comportement abrasif des particules. La figure II.22 représente un cas d'usure induite par des petits débattements. Le fretting réduit la limite à l'endurance en fatigue d'un facteur 5.



Figure II.22 : Usure induite par petits débattements

L'usure des aubes d'un turboréacteur (Figure II.23) est un exemple typique dans lequel les vibrations de fonctionnement sollicitent l'embase. Cette usure va jusqu'à la désolidarisation de l'aube et la destruction du réacteur.

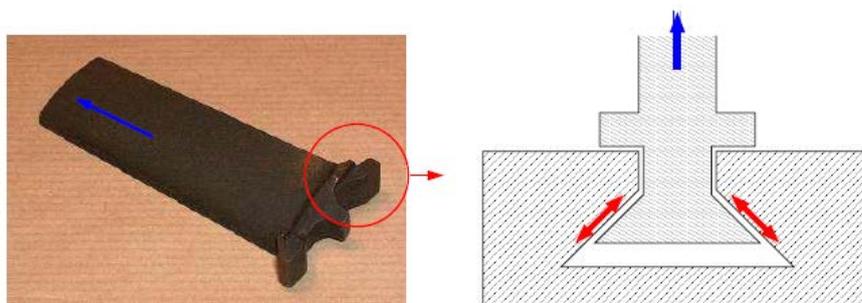


Figure II.23 : Phénomène de fretting dans une aube de turboréacteur.

- La force en bleue : associée aux micros débattements de l'attache
- Les forces en rouge : provoquent une usure et une dégradation du mécanisme pouvant aller jusqu'à la rupture.

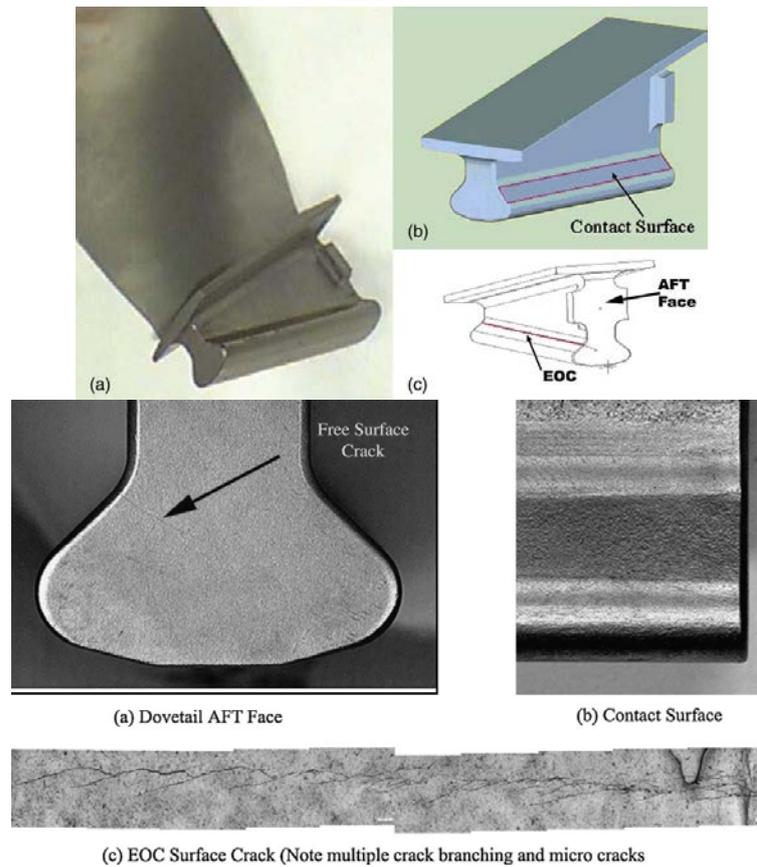


Figure II.24 : Propagation de fissures de fatigue dans le pied d'attache d'une aube de turboréacteur. K.W. Barlow*, R. Chandra 2005

II.3.3.4 Déformations plastiques superficielles

Elles résultent des surcharges extérieures globales sur les massifs ou locales dans l'interface (micro-géométrie, indentation) (Fig. II.20). Elles sont fréquemment associées à une dureté insuffisante du massif et précèdent les fatigues superficielles. Elles sont à l'origine d'amorçage de fissures.



Figure II.25 : Déformations plastiques superficielles

II.3.4 Effets physiques et chimiques

Les corrosions chimiques, électriques, bactériennes, électrochimiques ne sont pas à proprement parler des avaries de contact. Toutefois, étant à l'origine de modifications de la micro-géométrie des surfaces et de certaines de leurs propriétés, ces effets sont générateurs de fissures et de particules d'usure, et sont fréquemment à l'origine d'avaries mécaniques.

Sur la figure II.26 est représenté un endommagement de surface provoqué par le passage de courant entre les bagues d'un roulement.

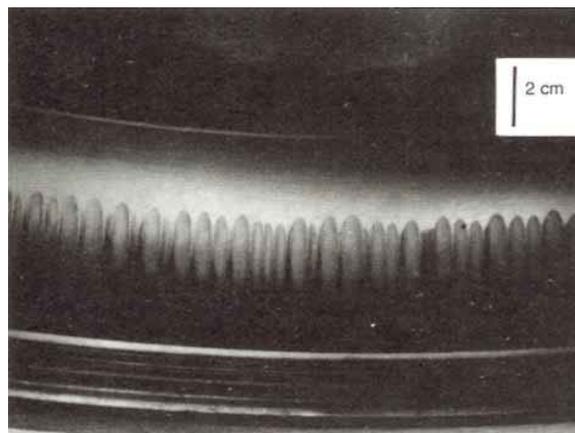


Figure II.26 : Effet du passage de courant

II.3.4.1 L'usure corrosive

L'usure corrosive (ou tribo-chimique ou tribo-corrosive) est un système où intervient la réactivité chimique entre les surfaces. On a une réactivité chimique avec le milieu environnant et une réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agents corrosifs contenus dans le milieu environnant l'interface et des sollicitations mécaniques pendant le frottement à vitesse lente (Figure II.27) et à vitesse rapide (Figure II.28).

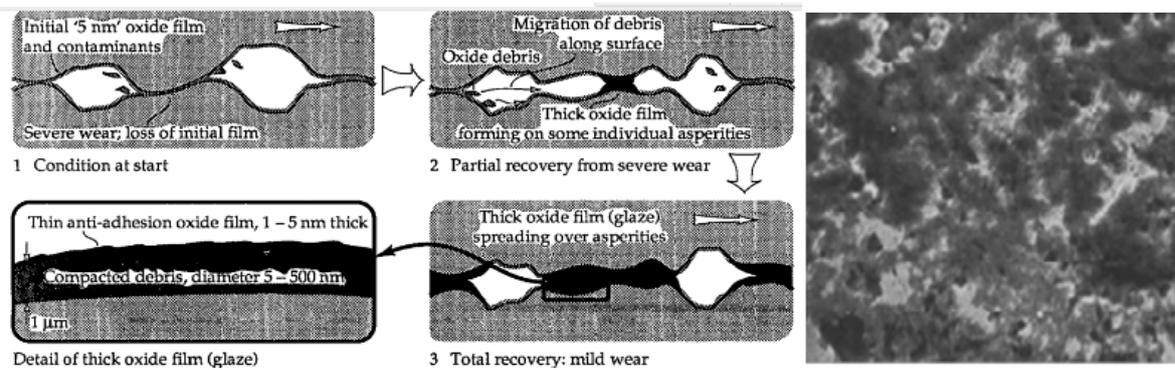


Figure II.27 : Mécanisme d'usure corrosive (à faible vitesse) et état de surface après une usure corrosive. Stachowiak

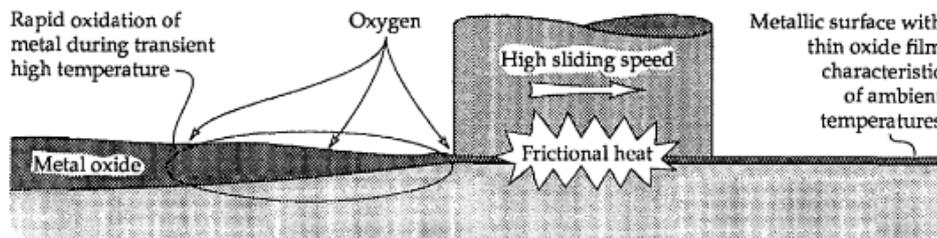


Figure II.28 : Rapide corrosion de surface (à haute vitesse). Stachowiak

II.3.4.2 Le fretting corrosion

Ce phénomène apparaît lorsque des pièces en contact sont soumises à des pressions plus ou moins élevées et à un léger mouvement vibratoire (exemple : clavetage). L'interaction avec le milieu environnement favorise la corrosion et cela se traduit par un aspect rougeâtre des surfaces en aciers en contact, due à l'oxyde de fer.

Comme les oxydes peuvent être des corps abrasifs, leur apparition peut entraîner de graves détériorations des surfaces et par suite être à l'origine de rupture par fatigue. Néanmoins, on peut rencontrer à l'interface la présence de particules oxydées moins agressives, leur effet peut être bénéfique dans le contact. Ces particules jouent le rôle de troisième corps (lubrifiant solide), des films de faible épaisseur adhèrent à la surface de l'un des antagonistes et jouent un rôle de protecteur contre l'usure abrasive.

II.3.5 La cavitation

Appelée érosion par cavitation, cette détérioration se produit lorsqu'il y a mouvement relatif entre une surface mécanique et un liquide.

Lorsque l'on aspire un liquide dans un conduit on crée une dépression, si cette baisse de pression fait descendre la pression du liquide en-dessous de sa pression de vapeur saturante, le liquide se met en ébullition (production de vapeur). On appelle ce phénomène la cavitation. Ces baisses de pressions en-dessous de la pression de vapeur saturante peuvent être très localisées par exemple sur les extrados des profils immergés ou dans les zones rétrécies de dispositif de pompage, l'accélération du fluide génère aussi une baisse de pression (Bernoulli). Ces baisses de pression internes des pompes sont décrites par le NPSH de la pompe. En se formant ces bulles augmentent le volume de fluide présent dans la zone de basse pression ce qui à pour effet d'augmenter la pression en certains endroits où la bulle de gaz se condense violemment en implosant. Les chocs créés par l'éclatement des bulles détruisent les parois des organes en contact avec le fluide.

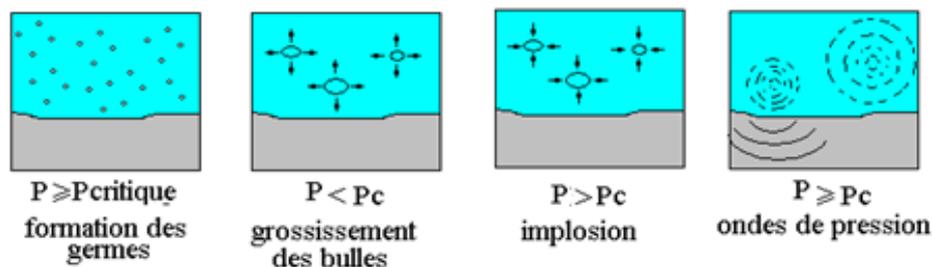


Figure II.29 : Processus de cavitation

On distingue deux mécanismes de cavitation, selon que la pièce est immergée dans le liquide (Figure II.30) ou soumise à des impacts de gouttelettes. Les faciès d'usures sont semblables dans les deux cas. Dans le premier cas le mouvement alternatif engendre dans le fluide des zones de basses pressions pouvant conduire à la formation d'une bulle de vapeur. Cette bulle implosera lorsque la pression atteindra de nouveau une certaine valeur en créant une onde de choc dont l'intensité peut être telle qu'elle provoque la formation de petites cavités superficielles.

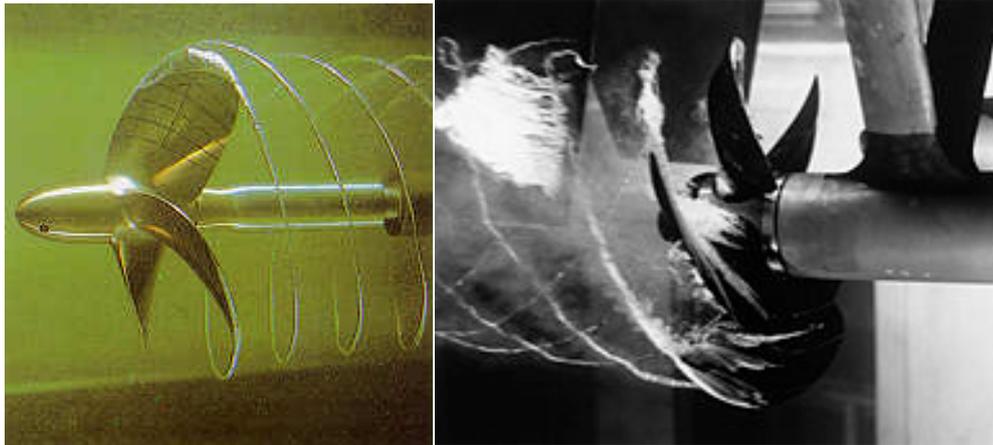


Figure II.30 : Photos montrant le phénomène de la cavitation créée expérimentalement par une hélice dans un tunnel d'eau.

L'impulseur de la pompe centrifuge (Figure II.31) a été entièrement rongé par la cavitation. Les zones plus ou moins lisses sont celles qui frottaient sur les parois avant le démontage. On remarquera aussi l'état de la rainure de clavette.



Figure II.31 : Impulseur de pompe centrifuge avec une vue de la périphérie

Dans le second cas, l'impact de gouttelettes de liquide de grande vitesse produit à la surface de la pièce une onde de choc qui provoquera elle aussi, la formation de petites cavités. Ce phénomène est appelé érosion par cavitation.

II.3.6 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 et bris du système cristallin, 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 et le comportement est très différent selon la nature du matériau. En général, on distingue quatre mécanismes principaux d'érosion par impact des particules solides (Figure II.33), coupe, fatigue, rupture fragile et fusion. Stachowiak et Batchelor (1993) ont suggéré les mécanismes possibles de l'érosion par impact des particules solides : érosion abrasive, fatigue de surface, rupture fragile, déformation ductile, fusion de surface, érosion macroscopique et érosion atomique.

- Si ce dernier est ductile, on trouve des rides annulaires très écrouies et cassantes et la vitesse d'usure passe par un maximum (Figure II.33) pour des angles d'incidence de 20 à 30° ;
- S'il est très dur et fragile, on ne trouve que des craquelures et l'usure augmente (Figure II.33) continûment avec l'angle d'incidence.

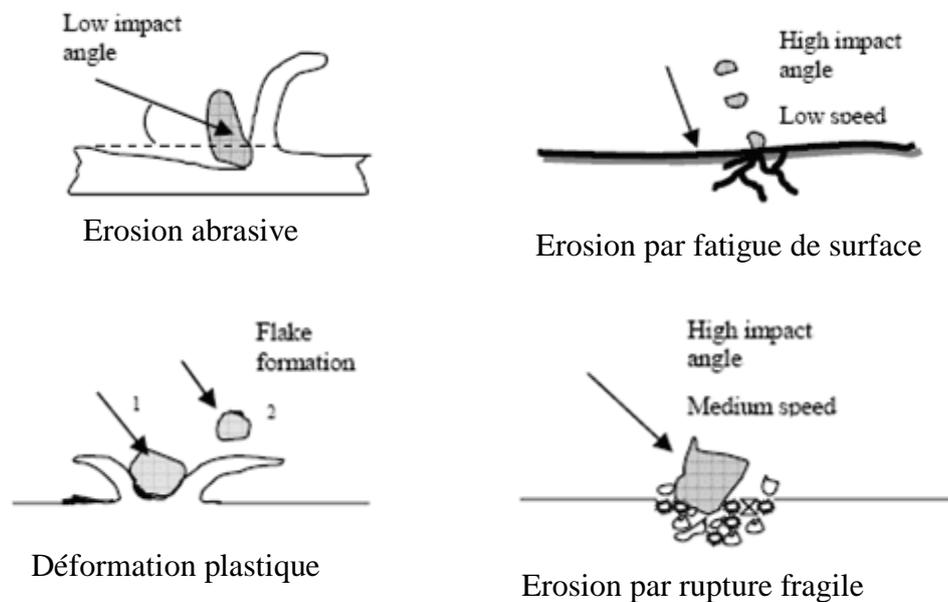


Figure II.32 : Comportement des surfaces lors de l'érosion, en fonction de la ductilité du matériau et de l'angle d'incidence des particules.

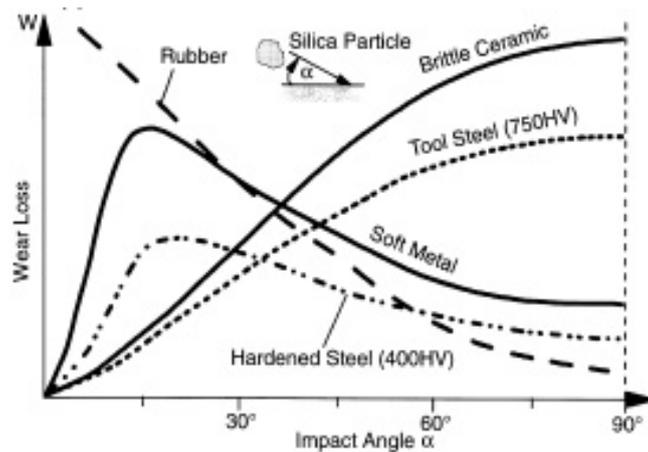


Figure II.33 : Influence de l'angle d'incidence des particules sur le taux d'usure.

Sur les figures suivantes (Figures II.34 et II.35) sont représentés des pièces mécaniques soumises à l'usure par érosion :

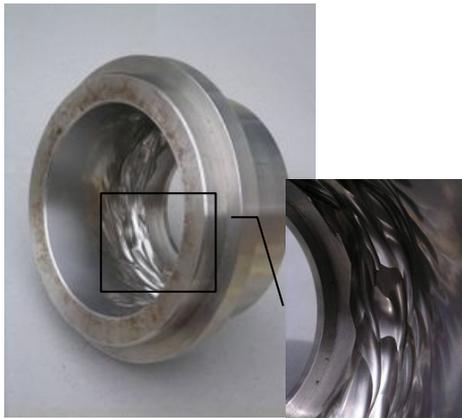


Figure II.34 : virole d'acier inoxydable



Figure II.35 : Aube de turbine à gaz usée par érosion

La virole d'acier inoxydable (Figure II. 34) a subi une usure par érosion. Elle porte des excavations irrégulières, assez profondes (environ 10 mm), dont la surface est polie. Dans cette virole passait une conduite sous très haute pression remplie d'un fluide corrosif chargé de particules abrasives, et cette conduite s'est percée.

Le même phénomène a touché cette aube de turbine à gaz (Fig. II.34) sous l'effet des gaz de combustion contenant des particules solides (gouttelettes de vapeur dans le cas d'une turbine à vapeur).

II.3.7 Approche quantitative de l'usure

L'étude des différents types d'usure montre que leurs mécanismes associés peuvent être très variés par leurs conditions d'apparition et par leurs effets. La quantification de l'usure devient alors difficile à réaliser. De plus, les paramètres de fonctionnement, environnementaux et des matériaux, associés au système tribologique étudié, peuvent évoluer durant le processus d'usure. En effet, H.C. Meng et K.C. Ludema ont recensé dans la littérature plus de 300 lois établis à partir de modèles développés durant des décennies, afin de pouvoir quantifier ce phénomène. Cependant, aucune de ces lois n'est générale et la plupart d'entre elles ont été développées pour des conditions bien spécifiques.

En 1953, Archard a étudié le phénomène de l'usure de plus près et a établi l'une des lois les plus usuelles. Une loi empirique qui permet d'estimer la perte de masse du matériau usé dans le cas d'un contact de glissement pour des matériaux de dureté très différente. Ce modèle de base a été appliqué initialement dans le cas de l'usure adhésive à sec. Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, notamment celui de l'abrasion. La forme la plus courante de la loi d'Archard est exprimée en fonction d'un coefficient d'usure k sans dimension, de la force normale appliquée F_N , de la distance de glissement L et de la dureté du matériau le plus mou H .

$$K_v = \frac{V}{L.F_N} \cdot H \quad II.1$$

Ce coefficient, qui est devenu un des critères les plus couramment employé pour évaluer l'usure a une valeur qui ne dépasse pas l'unité. Il nous donne une indication sur l'amplitude du phénomène (usure sévère - usure modérée) et il n'est obtenu que par le biais de l'expérience

II.4 Technique de caractérisation tribologique

La détermination du coefficient de frottement et du taux d'usure est essentielle pour la compréhension des mécanismes d'endommagement qui régissent le système tribologique.

La mesure du coefficient de frottement et de l'usure est délicate, et les valeurs obtenues doivent être interprétées en fonction des conditions de test, particulièrement de l'atmosphère (humidité, température, etc.) dans laquelle se déroule chaque test.

Les essais de frottement, à sec ou lubrifié, d'échantillons préparés préalablement sont réalisés à l'aide de tribomètres. Il existe plusieurs types d'installations d'essai tribologique, le choix est fonction de plusieurs critères, fonction des paramètres de caractérisations souhaitées.

La figure I.36 représente un tribomètre rotatif continu, bille sur disque, équipé de son système d'acquisition. Dans ce cas de figure le partenaire statique utilisé est une bille (acier, alumine, etc.). La bille est montée sur un support fixe alors que l'échantillon est monté sur le plan du tribomètre animé d'un mouvement rotatif. Les conditions opératoires des tests (charge normale N , vitesse cm/s , distance parcourue m) sont choisis au préalable et introduites dans le système d'exploitation.

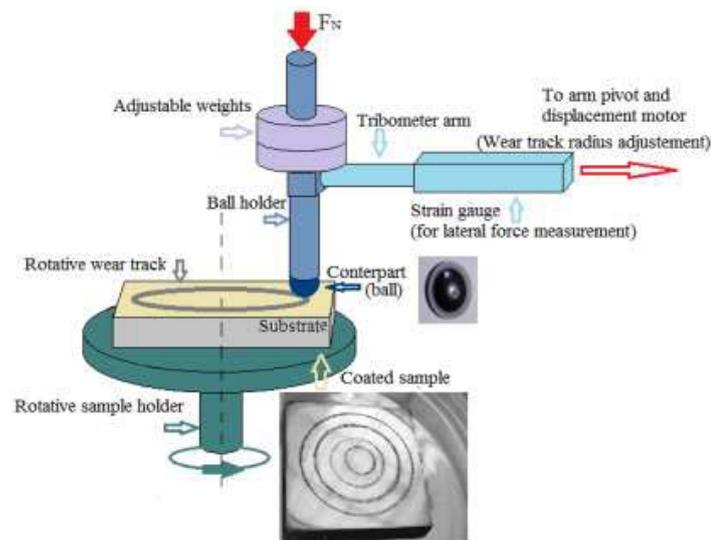
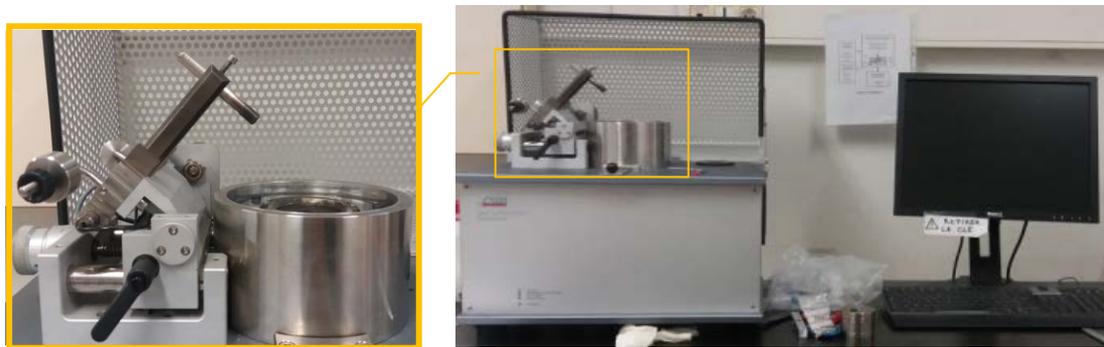


Figure II.36: Tribomètre rotatif pion/disque (bille/disque) avec son schéma de principe

Le tribomètre est équipé d'une chaîne d'acquisition numérique qui permet d'enregistrer l'évolution des paramètres du test. Les résultats exploitables sont les courbes du coefficient de frottement correspondant aux matériaux du couple bille-disque, le disque et la bille usés, qui vont permettre l'étude de l'usure du système tribologique testé. La courbe du coefficient de frottement (Figure II.37) donnée par le logiciel renseigne notamment sur les variations des paramètres tribologiques au cours de l'essai comme la force de frottement, le coefficient de frottement, la profondeur d'usure, la température. Ces paramètres sont donnés en fonction du paramètre choisi, de la distance de frottement, de la durée de frottement ou bien du nombre de cycles. Cette base de données permet l'interprétation du comportement tribologique du système pendant l'essai.

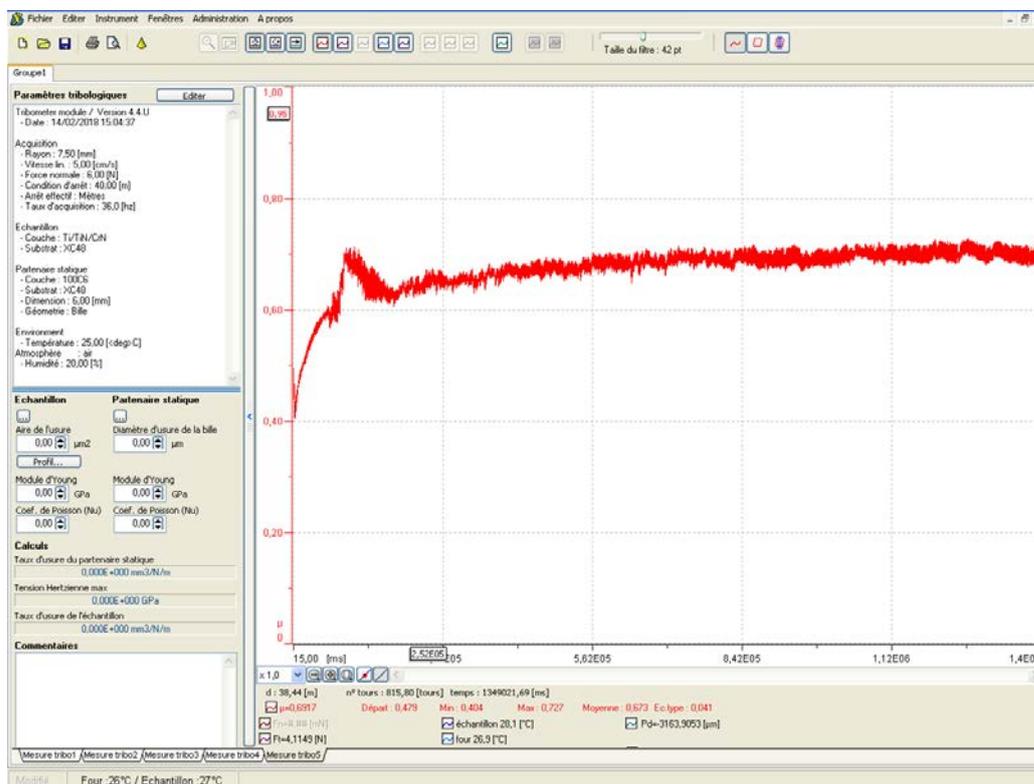


Figure II.37 : Courbe du coefficient de frottement

Généralement, l'augmentation du Coefficient de frottement (différence de dureté) se traduit par une augmentation de la surface de contact liée à une plastification des surfaces qui concerne en premier lieu la notion de résistance à la déformation (limite élastique). Cependant, la diminution du Coefficient de frottement est généralement associée à l'élimination du contact métal-métal et résulte d'un contact oxyde-oxyde.

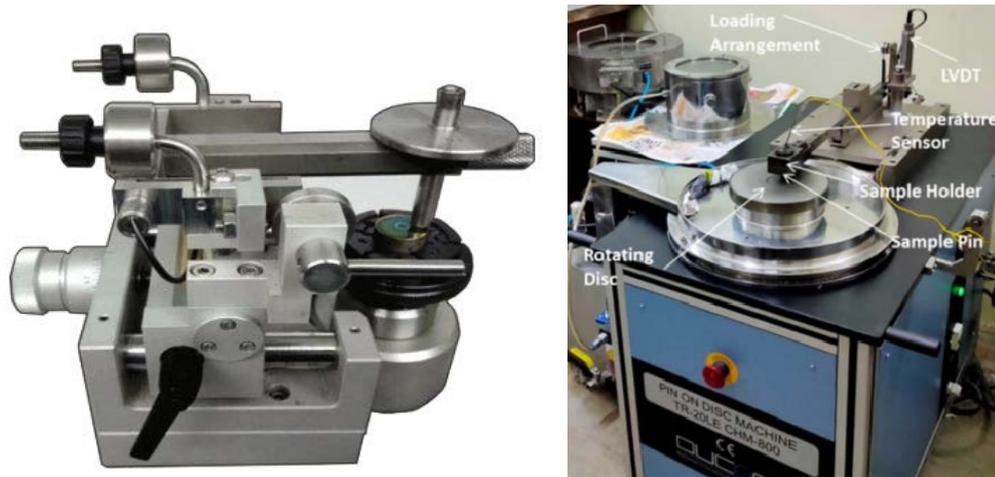


Figure II.38: Exemples de test tribologiques sur tribomètres rotatifs
 (Tests pour système disque de frein plaquettes Mrunal P. KSHIRSAGAR)

II.5 Analyse de l'endommagement de surface

Afin d'améliorer le comportement mécanique des matériaux constituant les systèmes tribologiques, une meilleure compréhension des mécanismes d'usure est nécessaire. Pour se faire, la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) (ou « Scanning Electron Microscopy » SEM) est souvent utilisée pour l'imagerie d'analyse. C'est une technique puissante d'observation de la topographie des surfaces, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. L'observation des surfaces est réalisée à des grossissements pouvant atteindre $\times 200\,000$, et permet notamment de :

- observer la morphologie de surface et en section transversale du revêtement ;
- observer la microstructure du revêtement et d'identifier son mode de croissance ;
- déterminer la taille moyenne des grains ;
- observer les traces d'usure ;
- déterminer la composition chimique des éléments présents en surface. Ceci est assuré à la fois par les spectromètres de dispersion d'énergie l'EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) et de dispersion de longueur d'onde le WDS (Wavelength Dispersive Spectrometry), lesquels sont intégrés au MEB.

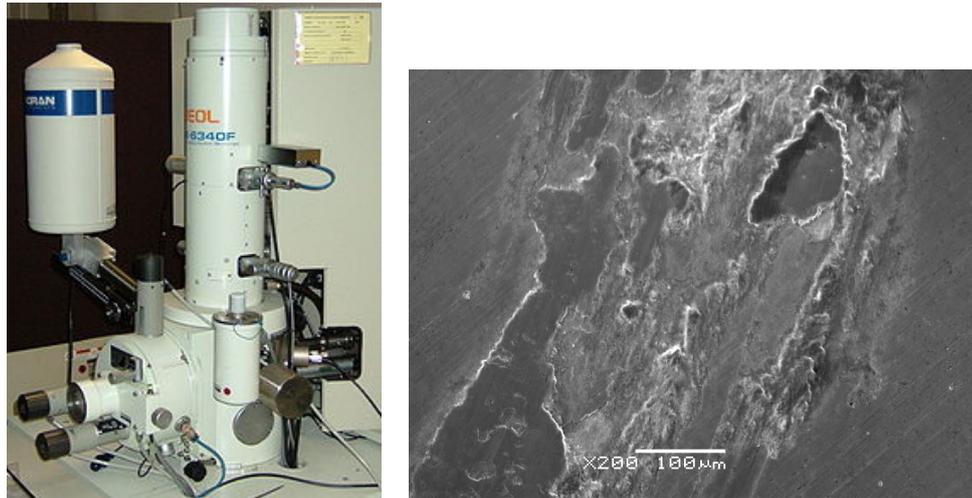


Figure II.39 : Microscope électronique à balayage (JEOL JSM-6340F).

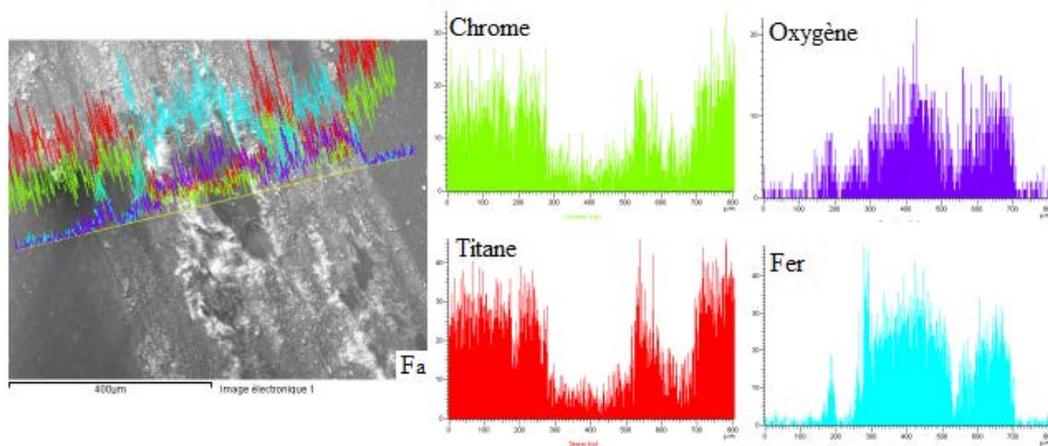


Figure II.40 : exemple d'une cartographie d'une piste d'usure obtenue à l'aide du MEB.

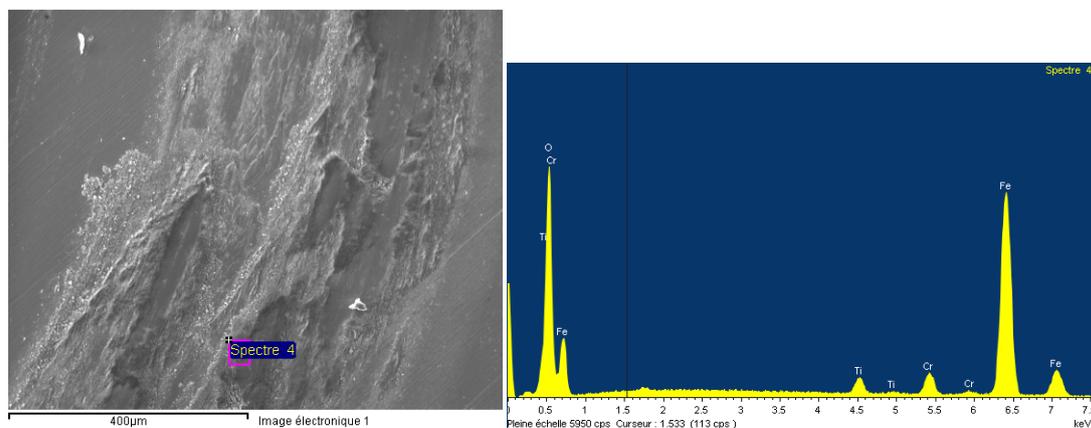


Figure II.41 : Exemple d'EDS, spécifiant la nature et la quantification des éléments chimiques présents dans la piste d'usure.

II.6 Estimation du taux d'usure

Pour calculer le volume d'usure des surfaces usées, des mesures doivent être effectuées sur l'échantillon à l'aide de la profilométrie optique. Dans le cas du tribomètre rotatif bille sur disque la formule communément utilisée est :

$$V = 2\pi \times r \times w \times d \quad \text{II.2}$$

Avec r le rayon de la trace d'usure, w la largeur de la trace d'usure et d la profondeur de la trace d'usure.

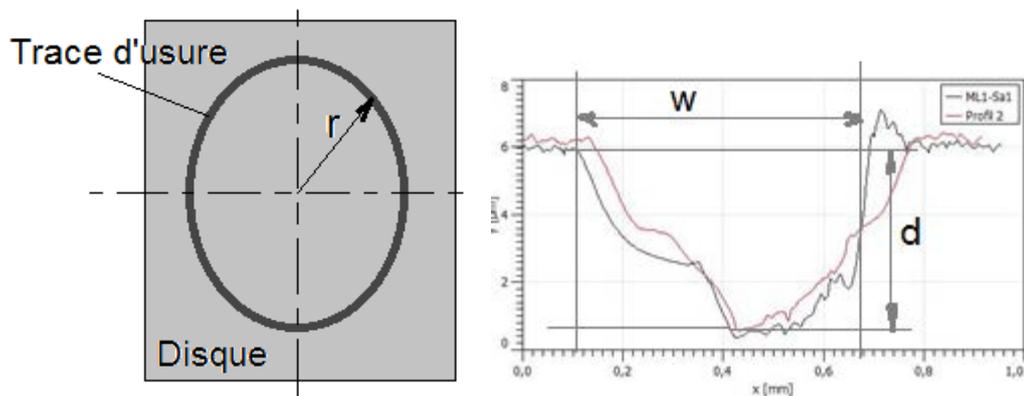


Figure II.42 : Technique de détermination du volume d'usure.

La notion de taux d'usure, qui exprime la perte de matière en fonction de la distance parcourue, est totalement inadaptée pour un grand nombre de situations. Dans ces cas, on préférera parler de durabilité qui fait référence au temps, ou au nombre de cycles d'utilisation pendant lequel la fonction est maintenue.

Pour améliorer les performances ainsi que la tenue d'une surface, on est amené à chercher à modifier soit sa dureté en surface, son énergie de surface ou sa résistance à la corrosion. Une des techniques fondamentales pour atteindre cet objectif est le revêtement.

Traitements superficiels et revêtements

III.1 Introduction

Les traitements de surface ont pour objectifs l'augmentation de la résistance à l'usure, ou la protection contre la corrosion. Plus récemment, ils ont trouvé des applications dans le développement de nouvelles technologies, comme barrières thermiques ou électriques par exemple. Par ailleurs ils permettent souvent de réaliser d'importantes économies d'énergie et de matières premières.

Le choix d'un type de revêtement doit se faire de manière à satisfaire les conditions de service du système, et à répondre au mieux aux impératifs techniques (résistance aux frottements, à l'usure, à la corrosion et aux propriétés particulières au système.

III.2 Amélioration de la résistance des surfaces par revêtement

Les progrès de la métallurgie avec une meilleure connaissance des propriétés superficielles des métaux ont permis le développement de l'industrie. Ces propriétés conditionnent le comportement des pièces dans le milieu où ils sont utilisés. Le choix de matériaux en vue d'applications mécaniques repose sur leurs caractéristiques de base :

- La dureté ;
- Le module d'élasticité ;
- La tenue à la fatigue ;
- La ténacité...

D'autre part la longévité ou l'endurance imposée en service :

- Résistance à la corrosion ;
- Résistance à l'oxydation ;
- Tenue au frottement.

Pour améliorer les performances ainsi que la tenue d'une surface, on est amené à chercher à modifier soit sa dureté en surface, son énergie de surface ou sa résistance à la corrosion. Une des techniques fondamentales pour atteindre cet objectif est le revêtement (traitement de surface). Les revêtements de surface constituent alors le meilleur compromis qui, dans des conditions sévères, assure la fiabilité des pièces.

Le choix du type de revêtement et de celui du procédé de mise en œuvre est fonction de plusieurs paramètres. En effet, le revêtement doit se faire de manière à satisfaire les conditions et répondre au mieux aux impératifs techniques. Quant au procédé utilisé pour sa mise en œuvre, il est dicté par des conditions d'exploitation industrielles (coût productivité...).

Effectivement le facteur économique est primordial, et le gain engendré par le revêtement en termes d'usure doit être suffisant pour justifier son emploi par rapport à la pièce non revêtue.

Différentes technologies de dépôt permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface. Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électro-dépôt, procédés de diffusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur et la projection thermique (Figure III.1).

Les procédés de dépôt par **voies humide** sont tous les procédés nécessitant le trempage de la pièce à traiter dans un bain contenant le matériau à déposer, comme les dépôts électrolytiques, chimiques et par immersion dans les métaux fondus.

Les procédés par **voies sèches** sont ainsi nommés par opposition aux procédés par voies humide. Il s'agit de procédés par voies gazeuse ou plasma. Bien que la technologie soit plus complexe, l'absence des bains confère des performances environnementales élevées.

Il est à noter que les couches de matériaux déposées sur des substrats peuvent être distinguées en fonction de l'épaisseur souhaitée. Elles se subdivisent en deux catégories : couche mince et couche épaisse. Ces dernières concernent les rechargements utilisés principalement dans la réparation des pièces mécaniques. Quant aux couches minces, depuis plusieurs années, deux grandes techniques de dépôt ont été développées : PVD (Physical Vapor Deposition) et CVD (Chemical Vapor Deposition).

III.3 Propriétés de surface d'un revêtement

Un matériau (ou pièce mécanique) revêtu par une couche mince forme un système Revêtement/Substrat, et est composé du substrat sur lequel est déposé un film mince qui bordera le contact lors du fonctionnement du système mécanique. Ce matériau doit répondre aux sollicitations tribologiques, et doit impérativement avoir de bonnes propriétés mécaniques et tribologiques comme indiqué sur la Figure III.1

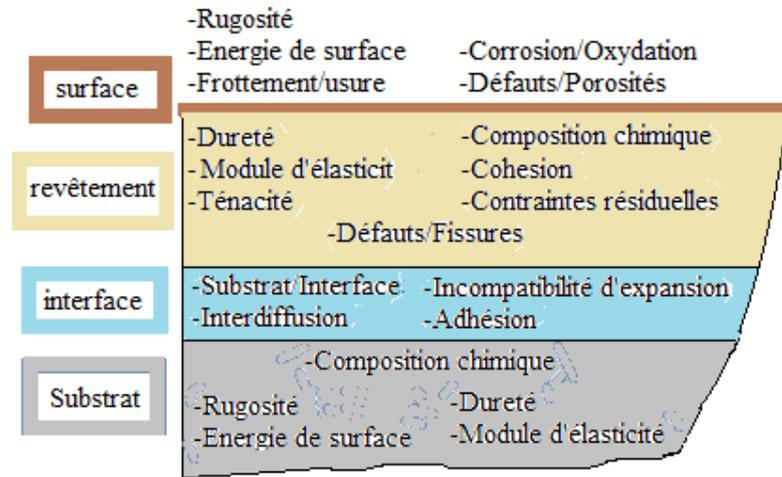


Figure III.1: Propriétés du système revêtement/substrat, nécessaires à la détermination de ses performances lors d'applications technologiques

En métallurgie, la *dureté* (H) est définie comme la résistance à la déformation plastique d'un corps. Elle caractérise la capacité d'un matériau (et donc sa surface) à résister à la pénétration. Elle est généralement mesurée en appliquant un effort au moyen d'un poinçon (plus dur que le matériau à tester) de façon à laisser une empreinte sur la surface (Figure. III.2). Pour les couches minces, l'essai de dureté se situe à l'échelle micrométrique, voir nanométrique. Le critère général de mesure de la dureté d'un revêtement, pour que l'influence du substrat soit négligeable, est que la profondeur de pénétration ne soit pas supérieure à 10% (règle de Buckel (1953)).

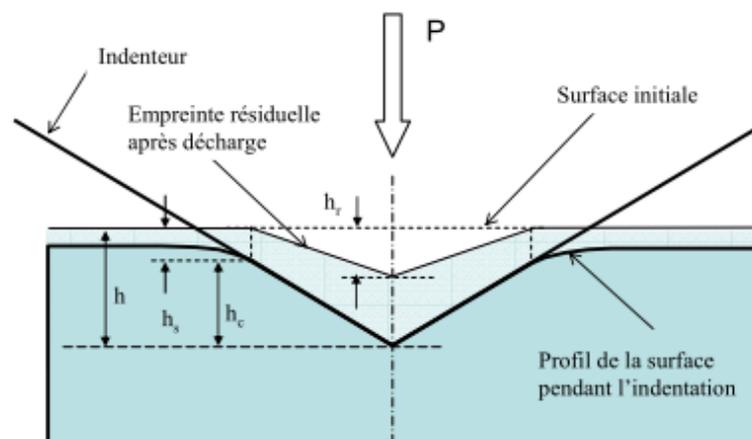


Figure III.2: Description de la géométrie du contact utilisée dans l'analyse O&P

La *ténacité* est l'aptitude d'un matériau à absorber de l'énergie pendant sa déformation jusqu'à la rupture. La résistance à la fissuration est la capacité à résister à la croissance de fissures préexistantes. Cette mesure est estimée par la charge critique à la fissuration, notée $Lc1$, lors du test de rayage. Nous allons l'évaluer entre autres, en utilisant le ratio H^3/E^{*2} (aptitude d'un revêtement dur à résister à la déformation plastique), après la détermination des caractéristiques mécaniques, de la dureté (H) et module d'élasticité (E), de chaque revêtement.

Le revêtement doit présenter une bonne *résistance à l'oxydation à haute température*.

L'accrochage mécanique du revêtement au substrat (Figure III.3) va varier selon la structure et les propriétés mécaniques intrinsèques du film obtenu. C'est là qu'intervient la notion d'adhérence du film, et cette notion est plus que capitale. Si l'adhérence du film avec la pièce recouverte est faible alors la performance du revêtement n'est pas exploitable. L'affaiblissement de la résistance de l'interface soumet le revêtement à l'écaillage plus facilement lorsqu'il subit une sollicitation. L'adhérence constitue un problème majeur et est essentiellement influencée par les contraintes résiduelles : d'une part, la différence de coefficients de dilatation du substrat et du revêtement entraîne une contrainte thermique lors de cycles thermiques ; d'autre part, les défauts dans les revêtements conduisent également à des contraintes intrinsèques. L'adhérence peut donc dépendre de l'état de contrainte du revêtement.

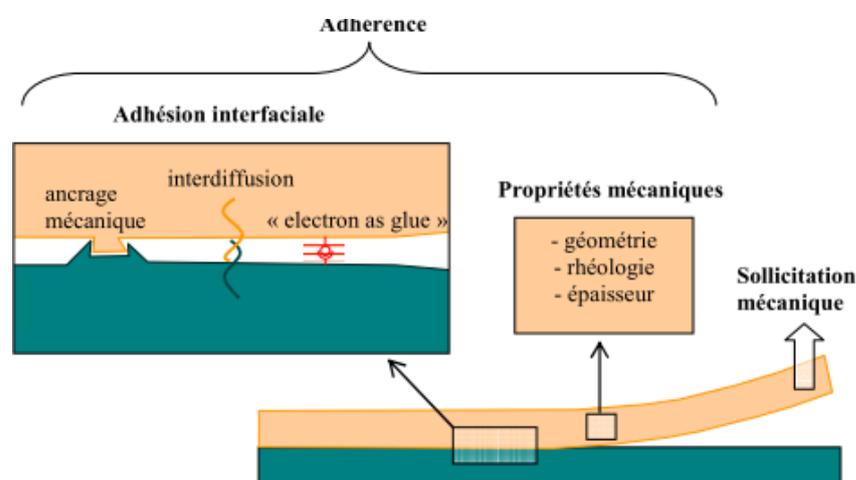


Figure III.3: Schéma des concepts d'adhésion et d'adhérence.

III.4 Principe d'élaboration des revêtements

Les traitements thermiques permettent non seulement de réaliser des dépôts protecteurs (revêtements électrolytiques et chimiques, dépôts chimiques et physiques en phase vapeur, dépôts projetés...) mais aussi de modifier des états de surface, tant du point de vue mécanique (martelage, grenailage...) que chimique ou microstructural (implantation ionique, traitement laser...). Ils ont en commun le fait qu'une faible épaisseur périphérique de la pièce va bénéficier de propriétés particulières. Les qualités recherchées peuvent être très différentes selon l'application considérée. Les diverses techniques de traitements et de revêtements de surface peuvent être regroupées en quatre grands groupes :

- Les traitements superficiels avec transformation structurale ;
- Les traitements thermochimiques avec diffusion ;
- Les traitements par conversion chimique ; et
- Les revêtements ou dépôts.

Les traitements de surface mécaniques (écrouissage) permettent, entre autres, l'amélioration des caractéristiques mécaniques de la couche superficielle ; nous avons :

- Le grenailage : projection à grande vitesse de billes de verre ou d'acier.
- Le sablage : projection de sable.
- L'ébavurage.
- Le polissage.
- Le galetage, ou roulement sous forte charge, d'un galet lisse sur la pièce (amélioration de la tenue à la fatigue).

Les traitements thermochimiques de diffusion

• La cémentation des aciers : diffusion à température élevée (1000°) du C contenu dans un ciment gazeux, liquide ou solide (généralement suivie d'une double trempe).

• La nitruration : diffusion d'azote (N_2), en milieu gazeux, accompagné ou non de carbone (C), à des températures de 500 ... 550°C. L'azote diffuse dans les aciers et forme, avec des éléments d'addition (Cr, Al, Mo, ...) des nitrures de grande dureté.

• La chromisation : diffusion de Cr, en milieu pulvérulent, à température élevée (+/- 950°C). Le traitement se fait au chlorure de Cr ($CrCl_2$), les pièces étant placées à l'intérieur d'un four électrique, le Cr pénètre dans le fer à cette température.

Les traitements thermiques

- La trempe : il s'agit d'un chauffage local de la surface d'une pièce en acier suivi d'un refroidissement à vitesse élevée, souvent réalisé par projection d'eau sous pression ou immersion. On vise à obtenir une grande dureté en surface, tout en conservant une bonne ductilité de la zone sous-jacente.

Les traitements de recouvrement ou de conversion.

Ces traitements permettent la formation d'un composé nouveau, en surface, par traitement électrolytique ou par immersion dans un bain, le but étant la formation superficielle de sels insolubles. Exemple, phosphatation des tôles de carrosseries, pour protéger de la corrosion.

Sur la figure III.4 est représenté le tableau résumant les techniques de traitement superficiels que l'on rencontre dans l'industrie, ceux-ci sont regroupés en Cinq familles (avec deux types de revêtement).

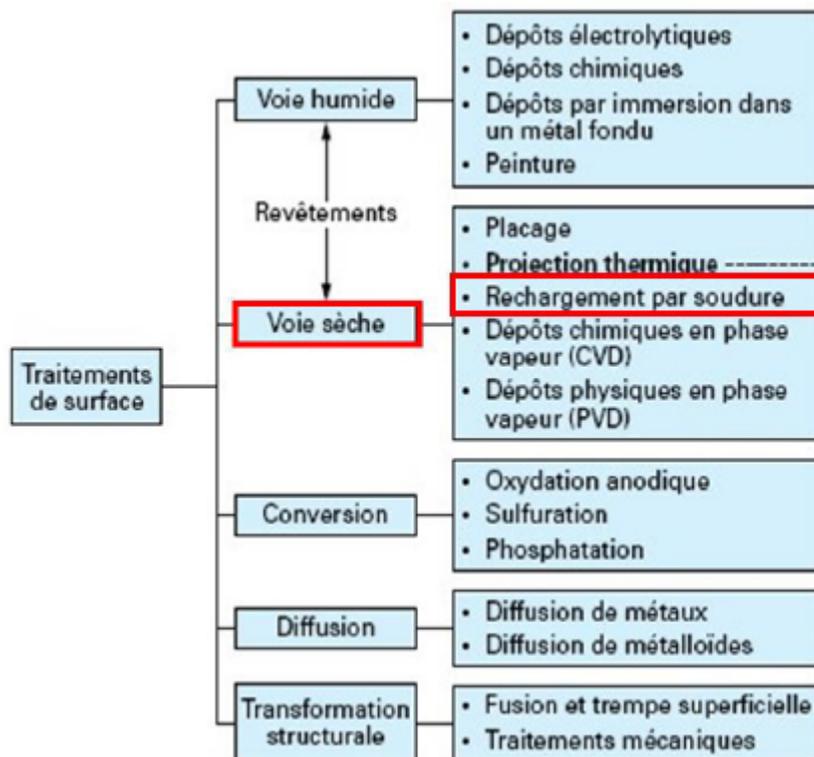


Figure III.1 : Diversité des modes de traitement de surface et rechargement.

III.5 Techniques de déposition du revêtement

III.5.1 Dépôts électrolytiques

C'est une des seules techniques par voie humide utilisée pour protéger les pièces mécaniques (chromage). Le substrat sur lequel doit s'effectuer le dépôt constitue la cathode d'un montage électrolyte dans lequel il baigne, contient des ions métalliques M^+ de charge positive. La polarisation des électrodes va provoquer une migration de ces ions vers la cathode, c'est à dire le substrat. L'ion métallique est neutralisé par les électrons fournis par la cathode et se dépose sur celle-ci sous forme de métal M les matériaux déposés par cette technique sont nombreux : zinc, étain, chrome, fer, cobalt, nickel, or, cuivre, argent, plus nombreux alliages. L'exemple du chromage : le chrome dur est le revêtement privilégié dans le domaine de la mécanique pour les pièces en rotation ou en translation qui ont à résister à l'usure et doivent avoir de bonnes qualités de frottement (vérins), et pour les domaines où l'adhérence pourrait être un handicap pour le procédé (plasturgie, cylindres de laminoir,...).

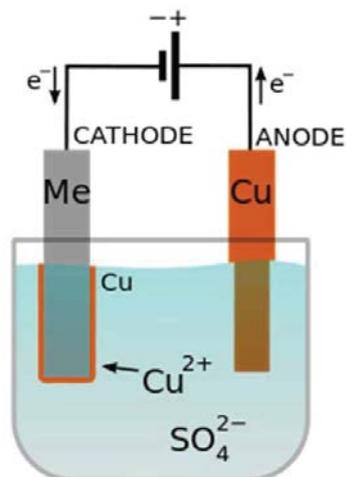


Figure III.2 : Dépôt de revêtement par électrolyse.

III.5.2 Revêtements par projection

Il existe diverses techniques de projection ou de rechargement par flamme, plasma, arc électrique, laser, ... de produits durs, métaux ou céramiques utilisés contre l'usure. Ces techniques concernent le revêtement (ou rechargement) d'un substrat par un matériau partiellement ou totalement fondu, propulsé à grande vitesse vers ce substrat. Les particules projetées s'étalent en recouvrant le substrat, en adhérant à ses irrégularités et aux couches précédemment déposées.

Le processus de métallisation consiste en ce qui suit : le métal fondu par flamme oxyacétylénique (Figure III.3), par arc électrique (Figure III.4) ou plasma est pulvérisé par un jet d'air comprimé en état de fines particules liquides sur la surface à restaurer. Les particules métalliques subissent, au cours de leur trajet dans le milieu ambiant, un refroidissement rapide. A leur arrivée sur le support, ces particules s'y plaquent et se lient les unes aux autres (Figure III.5). L'agglomération des parcelles ainsi liées forment le dépôt du métal projeté. La réaction chimique des particules fondues avec les gaz environnants et le transfert de chaleur avec le substrat vont affecter la qualité du dépôt, en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelles.

La métallisation au fil ou à la poudre est essentiellement une technique de réparation. Le métal de rechargement est apporté sous la forme de fil ou de poudre, il est projeté sur la pièce dans la flamme d'un chalumeau. La rapidité du procédé fait que la pièce ne subit pratiquement aucun échauffement lors du dépôt, mais l'absence de fusion superficielle fait que les revêtements obtenus sont le plus souvent poreux, ce qui, d'ailleurs, n'est pas forcément un inconvénient.

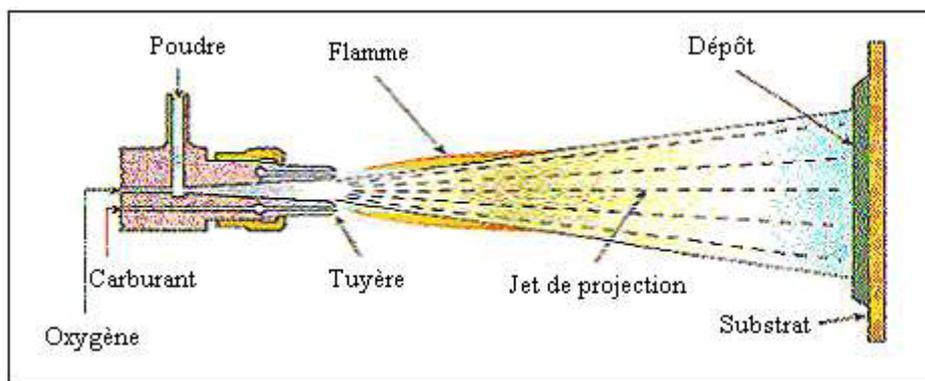


Figure III.3: Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre

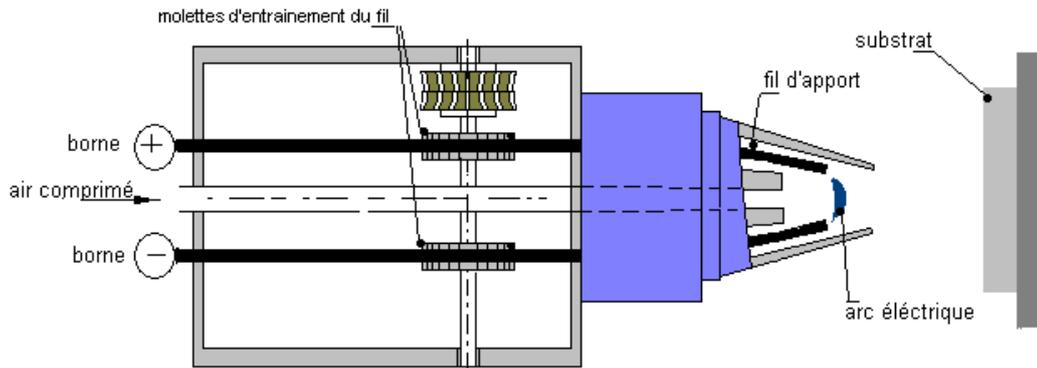


Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet à arc électrique.

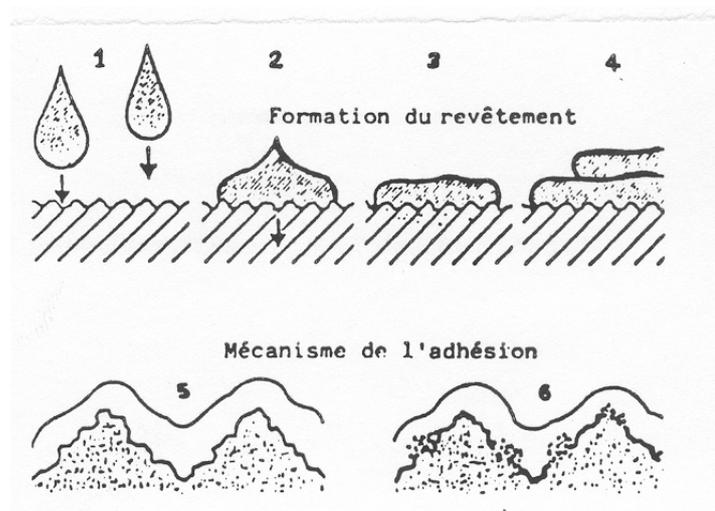


Figure III.5 : Mécanisme de formation du revêtement.

III.5.3 Rechargement par faisceau laser

Le laser permet le dépôt de poudres projetées dans un flux de gaz. L'action thermique très rapide et localisée limite l'échauffement et la déformation des pièces où les composés sont mélangés par la fusion superficielle. La formation d'alliages nitrurés, cémentés, avec des carbures, permet des compositions impossibles par d'autres techniques. Les surfaces plus dures, de structure plus fine, portent des couches homogènes très adhérentes.

Le rechargement par faisceau laser s'applique principalement à la réparation de composants (en particulier ceux en fonte comme des hélices, des transporteurs à rouleaux, des vis d'extrudeuse mais aussi des aubes de turbines, moules, joints de soudures...).

Son principe est basé sur un apport de matériau et le dépôt d'énergie s'effectuant au cours d'une même étape. Les matériaux déposés sont des poudres à base de Fe, Co, Cu ou Ni. Un jet de gaz inerte dirige la poudre vers la zone de travail à l'aide d'une buse adaptée. Le faisceau laser fond localement les matériaux d'apport et le substrat. Les sources lasers utilisées actuellement sont les lasers CO₂ et les lasers Nd :YAG. Pour les deux procédés proposés, les manipulations se font sous atmosphère neutre permettant ainsi de travailler avec tous types d'alliages.

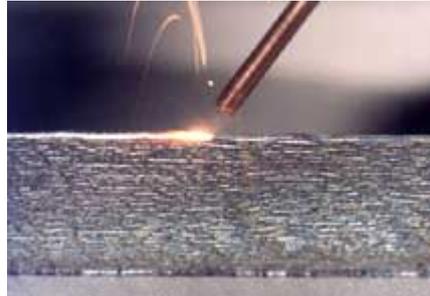


Figure III.6 : rechargement laser.

III.5.4 Les dépôts en phase vapeur

L'industrialisation des dépôts PVD a démarrée dans les années 80. À l'origine ces technologies de dépôt sous vide se sont développées à des fins d'application dans le domaine de la microélectronique. Grâce aux efforts de recherche, ils se sont développés par la suite, de manières notables. Et représentent actuellement, un fort potentiel pour l'amélioration des performances tribologiques des pièces mécaniques (protéger les surfaces contre les agressions tribologiques conduisant à l'usure, à la dissipation d'énergie de corrosion, ou problèmes d'adhésion).

Il existe différents moyens pour produire une vapeur :

- Dans le cas où elle résulte d'une réaction chimique, le dépôt est un dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ;
- Si au contraire elle est produite par un phénomène purement physique, tel que l'évaporation thermique ou la pulvérisation par des ions, le dépôt est un dépôt physique en phase vapeur (PVD).

III.5.4.1 Principe de déposition CVD

Le dépôt chimique en phase vapeur CVD est basé sur une série de réactions chimiques mettant en jeu des précurseurs gazeux composés des éléments du dépôt, avec un apport d'énergie (calorifique ou rayonnant), sous une pression quelconque.

On peut distinguer plusieurs variantes en CVD en fonction de l'énergie d'activation des réactions :

a) Principe d'une installation CVD

Sur la figure III.7 est représenté le schéma d'un dispositif de dépôt CVD, ce dispositif se compose des éléments suivants :

1 – générateur de gaz porteur, 2 – centrale de régulation des gaz + mélangeur, 3 – enceinte de dépôt à parois chaudes en acier réfractaire inoxydable, 4 – dispositif de chauffage régulé en plusieurs zones, 5 – ensemble de distribution des gaz, 6 – système de neutralisation des gaz corrosifs piégés par des absorbants.

b) Processus de base d'une opération de dépôt CVD

Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur (gaz précurseurs : $TiCl_4+H_2+CH_4$ ou N_2) et introduits dans une enceinte où sont placés les substrats. Les processus élémentaires décrivant une opération de dépôt CVD activée thermiquement, sont alors :

- Transport (convection libre et forcée des réactants gazeux) vers le substrat et réaction en phase gazeuse des espèces réactives (1 et 2),
- Adsorption des réactifs suivit d'une diffusion de surface des espèces sur le substrat (3 et 4),
- Réactions de formation et croissance du film (5),
- Désorption des produits secondaires gazeux de réaction (6),
- Transport de ces produits volatils de la réaction secondaires, du substrat vers la phase gazeuse et seront évacués du réacteur (7).

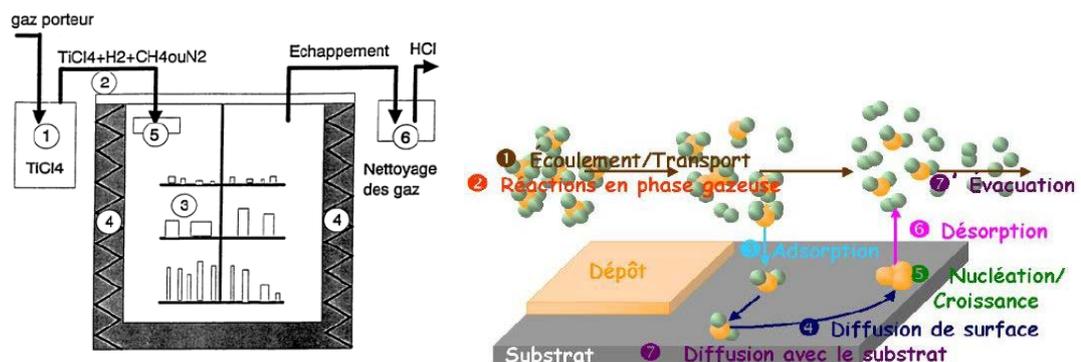


Figure.III.7 : Principe d'une installation CVD et étapes d'une opération de CVD activée thermiquement.

Afin de diminuer la température d'élaboration, variant de 600 à 1400°C pour un CVD dit classique, et donc, de limiter les modifications structurales et les variations dimensionnelles des pièces, différentes variantes se sont développées en faisant appel à l'utilisation de précurseurs plus réactifs tels que les organométalliques (MOCVD) réagissant à basses températures (300-800 °C) ou à des espèces activées chimiquement par un plasma froid et/ou un rayonnement (CVD assistée par plasma (PACVD) ou par laser (LCVD)). L'idée de base est de remplacer l'activation par chauffage de la réaction chimique, par une activation sous plasma ou laser.

Dans le cas du plasma PACVD, les espèces actives sont produites dans la phase gazeuse et sont accélérées par le champ électrique.

Dans le cas du laser LCVD, les espèces sont produites via l'absorption des photons du laser par les espèces neutres introduites dans le réacteur.

III.5.4.2 Principes de dépositions PVD

Les procédés de dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Déposition) forment un ensemble de techniques de revêtements métallurgiques ou films céramiques, regroupant une quantité importante de procédés. Le principe des procédés PVD consiste, d'une façon générale, en trois étapes essentielles à :

- La création ou génération d'une vapeur métallique à partir d'une source (cible),
- Son transport au sein d'un réacteur, en combinant éventuellement, la vapeur métallique avec un gaz dans une enceinte sous vide assez poussé (de 10^{-5} à 10^{-10} Pa) pour éviter la formation de poudre liée à une condensation en phase homogène,
- Sa condensation, et dépôt de quelques microns d'épaisseur à la surface d'un substrat à revêtir ; le revêtement croît ainsi par accumulation de matière provenant de la source érodée.

Le dépôt en phase vapeur physique (PVD) présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt en phase vapeur chimique, par exemple :

- Les films sont denses,
- Le processus est facile à contrôler.

a) Principales variantes des dépôts physiques en phase vapeur

Les différentes catégories de dépôts physiques en phase vapeur se caractérisent par:

- Le mode ou mécanisme par lequel le matériau de base est vaporisé,
- L'état électrique du substrat au moment où s'effectue la condensation,
- La nature du gaz constituant le milieu et l'interaction avec les éléments présents.
-

b) Classement par mode de production de vapeur

En fonction de la méthode d'attaque de la cible source pour la production de la vapeur métallique, plusieurs techniques permettent de mettre en œuvre le dépôt par PVD.

Dépôt par évaporation sous vide

Cette méthode consiste simplement à évaporer ou à sublimer le matériau à déposer en le chauffant à haute température (Figure III.9). Dès que la température de liquéfaction est dépassée, il se trouve que la pression de vapeur du matériau est sensiblement supérieure à celle résiduelle dans l'enceinte. Alors des atomes du matériau s'échappent et se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle soit : substrat, paroi de l'enceinte, un atome, une molécule se déplaçant dans l'espace. Dans le cas de rencontre d'une surface solide, il y aura séjour de l'atome sur la surface avec échange d'énergie et condensation définitive, si la surface est sensiblement plus froide que l'atome, il y a formation du dépôt. La rencontre avec une molécule résiduelle se traduit généralement par une déviation (choc élastique) de l'atome d'évaporant.

La pression du gaz conditionne le comportement et les déplacements des particules entre la source et le substrat. Pour augmenter le libre parcours moyen, il est indispensable que la pression dans l'enceinte soit suffisamment faible pour que la probabilité de rencontre d'un atome résiduel soit quasi nulle et les atomes éjectés conservent leur trajectoire rectiligne.

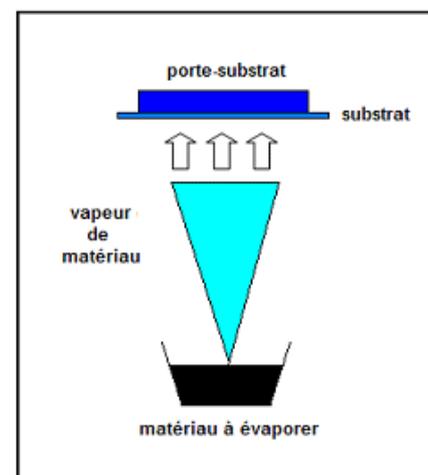


Figure III.8: Schéma de principe de l'évaporation.

- Il existe de nombreux types de procédure de chauffage du matériau à évaporer (source standard), allant d'une construction simple à des réalisations complexes : Par effet joule (Figure III.10(a)), par canon à électrons (Figure III.10(b)), par faisceau laser (ablation laser) (Figure III.11)

Les canons *BE* permettent de déposer divers types de matériaux.

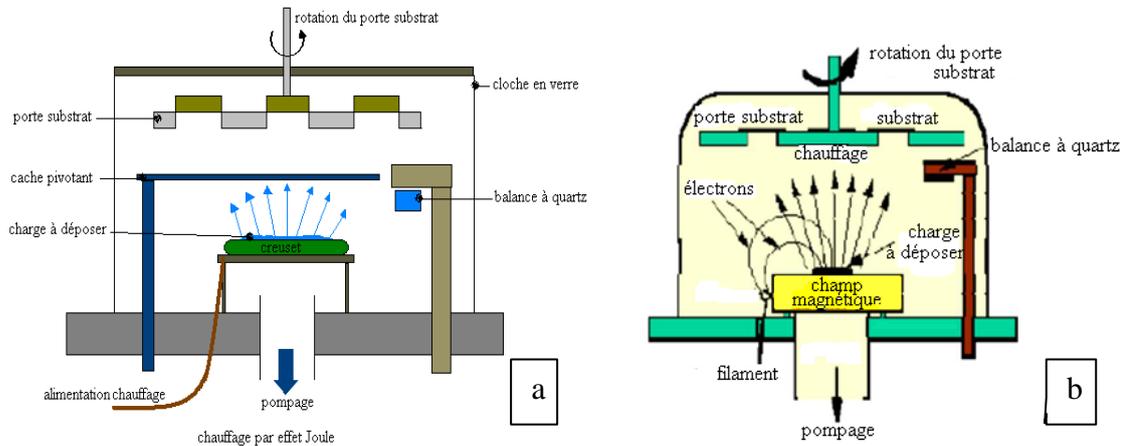


Figure III.9: a) Evaporation par effet Joule. b) Evaporation par bombardement électronique (filament).

Les principales applications du dépôt assisté par laser concernent le dépôt de céramiques (nitrure, carbure, oxyde), de supraconducteurs, de pseudo-diamant, de couche magnétique ou piézo-électrique.

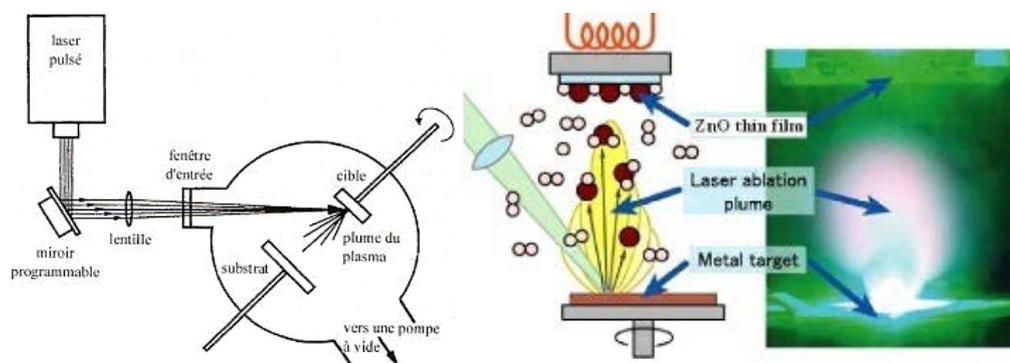


Figure III.10: Schéma PLD et principe de l'évaporation sous laser pulsé PLD

Evaporation cathodique par arc

Cette technique consiste, comme son nom l'indique, à évaporer la matière de la cible source à partir d'arcs électriques générés entre la cible et une électrode auxiliaire. Les atomes ainsi arrachés sont ionisés puis accélérés grâce à un champ électrique appliqué entre les parois du réacteur et le porte-substrat, polarisé négativement, pour finalement s'accumuler à la surface du substrat. Cette polarisation est à l'origine de la très bonne adhérence qui caractérise cette technique de dépôt. En outre, cette technique permet de revêtir efficacement des pièces à la géométrie plus irrégulière avec une meilleure homogénéité du revêtement dans l'épaisseur est en outre encore améliorée.

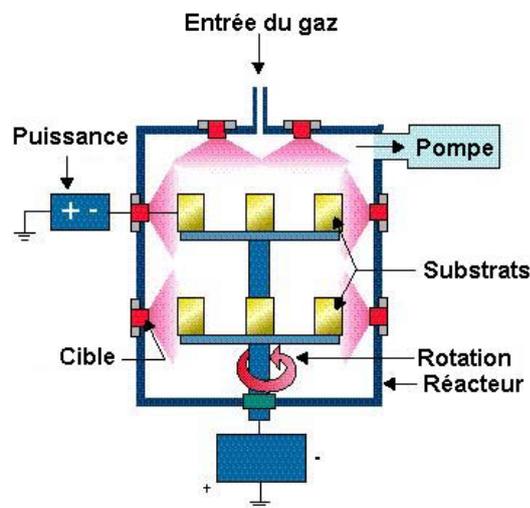


Figure III.11 : Schéma d'une installation PVD d'évaporation par arc.

Procédés par pulvérisation

Une définition assez large de la pulvérisation est « l'érosion de la surface d'un matériau à l'échelle atomique sous l'impact d'une particule ».

Les principales techniques sont :

a) **La pulvérisation par faisceau d'ion** (*Ion-beam Sputtering - IBS*)

Dans une source Kaufman des ions sont générés par la collision avec des électrons qui sont confinés dans un champ magnétique comme dans un magnétron. Ils sont alors

accélérés par le champ électrique émanant d'une grille, vers une cible. Lorsque les ions quittent la source ils sont neutralisés par les électrons provenant d'un second filament. Comme le flux qui frappe la cible se compose d'atomes neutres, des cibles conductrices ou isolantes peuvent être pulvérisées. L'IBS concerne particulièrement les revêtements très exigeants. Grâce à la forte répétabilité de l'IBS et à sa faible vitesse de dépôt, les épaisseurs de couches nécessaires peuvent être fabriquées avec une grande précision. De plus, le processus produit des revêtements très compacts, insensibles aux changements de température et présentant une très faible diffusion.

b) Principe de pulvérisation à cathode creuse (Glow Flow Sputtering - GFS)

Cette technique est basée sur l'utilisation d'une configuration géométrique particulière de la cathode. Un accroissement du taux d'ionisation de la décharge est obtenu engendrant un plasma dense donc une importante érosion de la cible et une vitesse de dépôt élevé.

c) Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt sous vide fonctionnant à froid, en plasma luminescent, dans un gaz maintenu à pression réduite. Le caractère mécanique du processus fait que la source de dépôt reste froide.

Cette technique présente l'avantage de pouvoir fournir des espèces réactives sans avoir à chauffer ni le substrat, ni la cible, ce qui permet de déposer en films minces toutes sortes de matériaux simples ou composés (un matériau cible composé de plusieurs éléments se pulvérise aussi bien qu'un corps simple), notamment les matériaux réfractaires ou non, alliés ou non, conducteur ou diélectriques puisqu'il s'agit d'un processus mécanique. Tous types de substrats (conducteurs ou diélectriques) qui acceptent une mise sous vide et un léger échauffement (60 à 70°C), peuvent être traités par ce procédé.

Suivant la nature de la tension appliquée entre les deux électrodes (cible et substrat), deux méthodes de pulvérisation se distinguent :

➤ **Pulvérisation cathodique diode en courant continu (DC)**

Cette méthode est restreinte à une utilisation pour des dépôts de couches métalliques (métaux et alliages) ou semi-conductrices (carbone silicium germanium ou carbure de silicium), pour cause, les charges électriques positives apportées par les ions sur la cible ne peuvent être écoulées par le matériau isolant. Par conséquent le plasma s'éteint et le dépôt ne peut se produire.

Sur le substrat tout type de matériaux conducteurs ou isolants peuvent être recouvert en tenant compte des limitations à la tenue au vide et surtout la résistance à l'échauffement.

➤ **Pulvérisation radio fréquence (RF)**

La pulvérisation radiofréquence a été développée pour pouvoir pulvériser des cibles isolantes, ce qui n'est pas possible en diode continue puisqu'aucun courant ne traverse l'isolant.

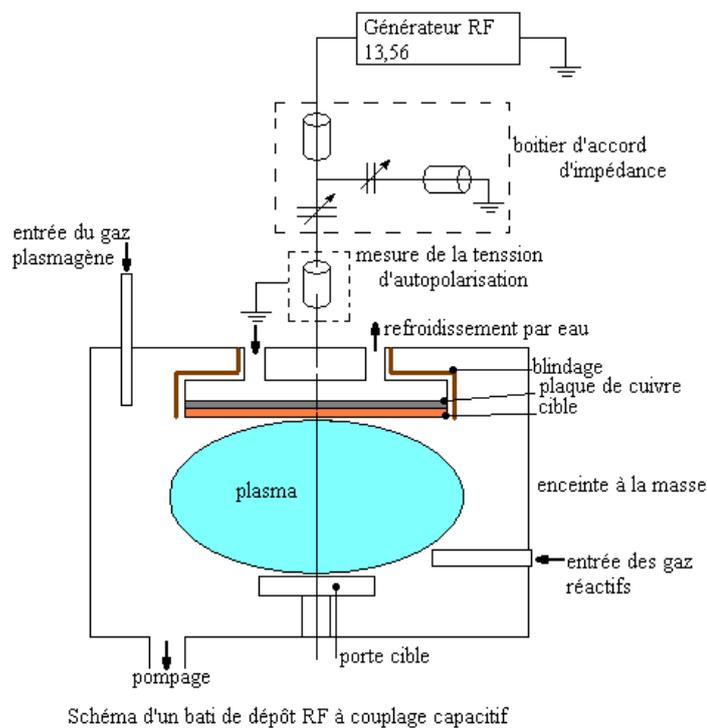


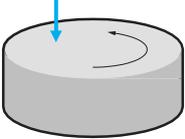
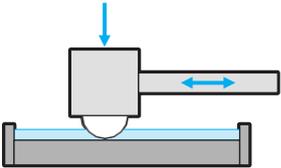
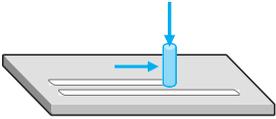
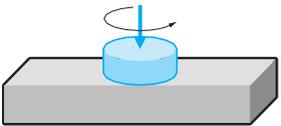
Figure III.12: schéma d'un bâti de dépôt RF à couplage capacitif

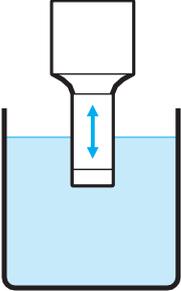
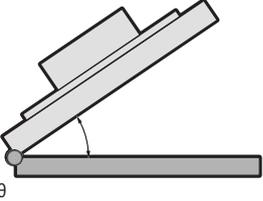
Références Bibliographiques

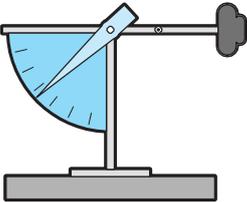
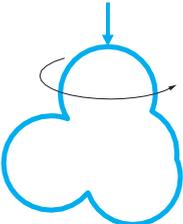
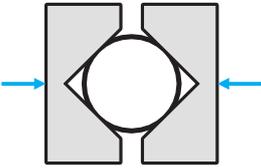
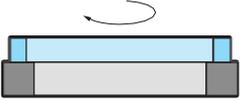
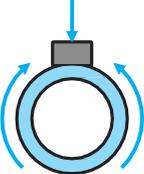
- Archard, J.F. «Contact and rubbing of flat surfaces.» *J. Appl. Phys.*, 1953: 981-988.
- Atmani, Taous-Doria. *Etude de l'apport des couches minces déposées par pulvérisation magnétron pour la réduction des pertes d'énergie par frottement*. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, 2022.
- Barrau, O. «Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud.» Thèse de Doctorat en Science et Génie des Matériaux, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- Brunetière, N. *Introduction à la TRIBOLOGIE*. Institut Pprime - Futuroscope, 2016.
- Büchel H., Westbrook J.H., Conrad H. «The science of hardness testing and its reaserch application.» *American Society of Metals, Metals Park, OH* (Metals Park) OH. 453 (1953).
- Éric FELDER, Pierre MONTMITONNET. «Théorie de l'usure - Mesure, caractérisation des contacts et vitesse d'usure.» *Techniques de l'Ingénieur*, 2015.
- Greenwood J.A., Williamson J.B.P. «Contact of nominally flat surfaces.» *A295* (1966): 300-319.
- Guillais J.C., Leroux C., Daures P. *Procédés électriques dans les traitements et revêtements de surface - 1: Approche d'un problème de traitement de surface, présentation de quelques cas industriels*. Electra. 7 vols. DOPEE/85, 1989.
- Labidi, C. «Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitement de surface et préparation de l'arête de coupe.» Thèse de Doctorat en Mécaniques et Matériaux, L'école d'Arts et Métiers ParisTech, 2006, 209.
- Mazuyer, D. «La force de frottement limite.» Thèse de Doctorat en Mécanique, Ecole centrale de Lyon, 1989, 90.
- Mege, A. «Comportement à l'oxydation haute température de films nanocomposites du système Me-Si-N (Me = Ti, Cr) déposés par procédés sous vide sur acier.» Thèse de doctorat en Génie des matériaux: Microstructure, Comportement Mécanique, Durabilité, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2008.
- Mendibide, C. «Caractérisation de revêtements PVD nanostructurés à base de nitrures de métaux de transition pour application mécanique. Aspects chimiques, mécaniques et tribologiques.» Thèse de doctorat en Microstructure et comportement mécanique et macroscopique des matériaux-Génie des matériaux , Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003, 178.
- Meng H.C., Ludema K.C. «Wear models and predictive equations: their form and content.» *Wear* 181-183 (1995): 443-457.
- Rachpech, V. «Synthèse et caractérisations structurale, physicochimique et de résistance à l'oxydation à chaud de revêtements de nitrures de chrome enrichis en silicium obtenus par un procédé hybride arc-magnétron.» Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.
- Robbe- Valoire F., Baffoni B., Progi R. «Load transmission by elastic,elato-plastic or fullyplastic deformation of rough interface asperities.» 2001: 617-633.
- Roy, S. «Mesure de l'adhérence et des propriétés mécaniques de couches minces par des essais dérivés de la nanoindentation : application à la microélectronique et au biomédical. Mechanics.» Thèse de Doctorat en Science et Génie des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008, 191.
- Stachowiak G.W., Batchelor A.W. *Engineering Tribology*. 1st Edition. Édité par Elsevier. 1993.
- Tabord, D. «"Friction and wear developments over the last fifty years.» *I. Mech. E*, 1987: 157-172.

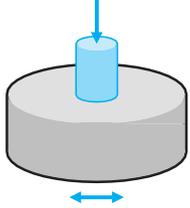
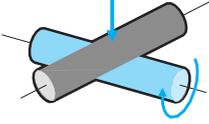
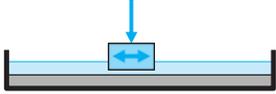
Annexe

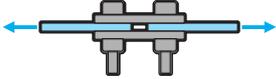
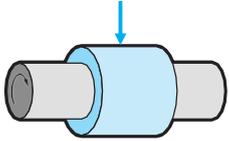
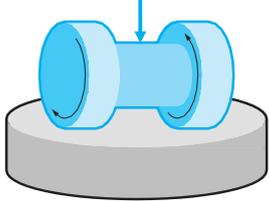
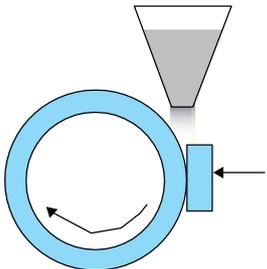
Configuration des tests tribologiques normalisés. 'Tribomètres et essais tribologiques', Techniques de l'Ingénierie TRI 2010V1 (2019).

Configuration	Objet du test	Domaine d'application	Norme
	Mesure du coefficient de frottement et de l'usure en mouvement continu	Roulement à billes, glissière à billes	ASM G-99, DIN50326, ISO 7148
	Mesure du coefficient de frottement et de l'usure en mouvement alternatif	Roulement à billes, glissière à billes, matériaux autolubrifiants, lubrifiants, segment/chemise	ASM G-133, ISO 7148, G-181
	Mesure de l'usure par abrasion	Outils de travail au sol, mines, carrières, travaux public, machinismes agricoles	ASTM G-132
	Mesure du seuil de grippage d'un couple de matériaux	Vannes, pompes, glissières	ASTM G-98

	Essai de cavitation par ultrason	Paliers, vannes, pompes	ASTM G-32
	Essai de mesure de coefficient de frottement plan/plan	Film plastique, bois, panneau de particules, chaussée	ASTM D1894, D2394, D3247, NF P98-220-1, C1028
	Essai de mesure de coefficient de frottement statique avec plan incliné	Plaque tissé, panneau de particules, dépôts	ASTM D3248, D3334, D4518

Configuration	Objet du test	Domaine d'application	Norme
	Essai de mesure de coefficient de frottement par pendule	Bois, caoutchouc, chaussée	ASTM D4103, EN 13036-4
	Essais	Lubrifiant	ASTM D2266, D4172, D5183, D2783
	Essai pion et blocs en V	Lubrifiants, graisses	AS
	Essai bague sur bague	Matériaux autolubrifiants pour butée	ASTM D3702
	Essai bloc sur bague	Matériaux, lubrifiants, graisses	ASTM D3704, G77, G137

	Essai pion sur plaque	Matériaux polymères pour prothèses	ASTM F732
	Essai cylindres croisés	Matériaux métalliques	ASTM G83
	Essais d'abrasion - test Miller	Abrasivité des granulats, résistance à l'abrasion de matériaux	ASTM G-75

Configuration	Objet du test	Domaine d'application	Norme
	Mesure de coefficient de frottement des pièces boulonnées		NF P22-461
	Mesure de comportement tribologique pour palier lisse	Matériaux anti-friction	ISO-7148-2
	Essai d'abrasion Taber	Matériaux, revêtements	ASTM F-1978
	Essai d'abrasion	Matériaux, revêtements	ASTM G-65