

# PLAN DE COURS: Propriétés des Surfaces

**Rédigé par:**

**YOUNES Rassim**

## **Tables des matières**

### **Chapitre 1 : Mécanique des surfaces**

- I. Structure des surfaces
- II. Critères fonctionnels des surfaces industrielles
  - II.1 Critères physico-chimiques
    - II.1.1 Critères chimiques
    - II.1.2 Critères physiques
  - II.2 Critères mécaniques
    - Résistance mécanique
  - Contraintes résiduelles
  - II.3 Critères métallurgiques
    - Structure cristallographique
    - Effet de l'environnement
  - II.4 Mécanique du contact lisse et rugueux
    - Etat de surface
    - Défauts de rugosité
  - II.5 Les paramètres de la rugosité

### **Chapitre 2 : Frottement Statique et dynamique**

- I. Frottement statiques
  - I.1. Le coefficient de frottement statique  $\mu_s$
  - I.2 La force normale FN
  - I.3 Frottement cinétique
- II. Lois empiriques du frottement
- III. La déformation élastoplastique des aspérités
- IV. Modèle de Bowden et Tabor

## Chapitre 3 Usure des surfaces

### I. Mécanismes de dégradation de surface

I.1 Usure par adhésion

I.2 Usure par fissuration

I.3 Usure tribochimique

I.4 Usure abrasive

I.4.1. Usure abrasive par déformation plastique

I.4.2. Usure abrasive sans déformation plastique

I.3 Usure tribochimique

I.4 Usure abrasive

I.4.1. Usure abrasive par déformation plastique

I.4.2. Usure abrasive sans déformation plastique

I.5. Paramètres influençant l'usure abrasive

I.5.1. Caractéristiques des particules abrasives

I.5.2. Rôle de la porosité

I.5.3. Rôle de la rugosité de surface

I.5.4. Rôle de la dureté de surface

### Informations sur le cours

Faculté: Sciences de la technologie

Département: Génie mécanique

Public cible : 2<sup>ème</sup> année Master,

Spécialité : MIM

Intitulé du cours : Propriétés des Surfaces

Crédit:03

Coefficient:03

Durée : 15 semaines

Horaire: Mardi: 09h30-11h00

Salle: Hall Technologie

#### **Enseignant :**

Cours: Dr. YOUNES Rassim

Contact : par mail au [rassimyounes@yahoo.fr](mailto:rassimyounes@yahoo.fr)

## Pré-requis

Pour pouvoir tirer le maximum de ce cours il faut connaître :

Calculer, essayer, étudier toujours et mettre en pratique les résultats théoriques avec le fruit de ses expériences

- Réaliser l'architecture d'ensemble d'un produit.
- Vérifier la fiabilité de ses projets en soumettant par exemple les pièces à différentes contraintes grâce à des simulations sur ordinateur.
- Trouver et effectuer les corrections à apporter si nécessaire.
- Déterminer les moyens utiles en vue de l'expertise
- S'assurer du bon fonctionnement d'un état de surface.
- Microscopie (structure et microstructure)

## Visées d'apprentissage

La compétence visée par ce cours, dans son ensemble, est « d'être capable de concevoir, d'analyser et d'implémenter un état de surface système avec vos pré-requis en vous appuyant sur la théorie des diagramme de phase et de étude microstructural pour le choix des circuits à utiliser tout en répondant aux exigences d'un commanditaire ». C'est une performance complexe, que vous allez construire progressivement en maîtrisant des savoirs, en mettant en œuvre des savoir-faire et en le faisant avec un savoir-être de professionnel.

## Modalités d'évaluation des apprentissages

L'évaluation finale se fait à travers:

**a. Un examen final sur table** et qui porte sur tout ce que vous avez vu dans ce cours pendant le semestre, lors de cet examen, qui compte pour 80% de la note finale (figure 1), vous aurez

A résoudre des problèmes similaires ou proches aux problèmes traités lors des exercices durant le cours, des TP et des interrogations.

A répondre des questions de réflexion. (vous serez entraînés à répondre à ce type de questions par les questions posées lors des TP)

Des interrogations écrites de courte durée qui portent sur les concepts vus et qui seront prévues toutes les 2 semaines, soit 1 interrogations/ 2 séance de cours.

✓ Les Tps programmés chaque semaine, à raison de 4 TPs par semestre, qui vont traiter chaque point vu pendant le cours, le TP consiste a une partie pratique à réaliser au labo, l'évaluation du TP est basée sur la réponse aux questions posées pour expliquer les résultats obtenus au labo, le compte-rendu qui résume la partie expérimentales.

### **Modalités de fonctionnement**

Le cours est organisé en :

- ✓ Séances théoriques afin de vous transmettre l'ensemble des savoirs permettant de cerner rapidement les définitions de bases et les méthodes de travail à suivre.
- ✓ En séances de travaux pratiques afin de mobiliser les savoirs acquis dans la conception des systèmes réels.
- ✓ Le déroulement du cours est assuré en mode presentielle.
- ✓

Le dispositif en ligne contient des espaces pour:

Télécharger les différents chapitres après l'échéance programmée pour la préparation de vos test.

Déposer votre projet individuel dans l'espace approprié.

### **Ressources d'aide**

Les liens vers despackages : ressources fortement recommandée car au cours de la conception vous allez être face aux différentes situations qui nécessitent différents outils.

### **Visées d'apprentissage**

La compétence visée par ce cours, dans son ensemble, est « d'être capable de concevoir, d'analyser et d'implémenter un système théorique en relation avec état de surface pour le choix des outils à utiliser est très important pour le but de répondre aux exigences d'un commanditaire ».

En termes de connaissances, à vous apprendre les notions transcription du fonctionnement d'un tribologique donné.

En termes de savoir-faire,

- à vous entraîner à analysé et expertise un facies de rupture pour la conception des circuits tribologique réels.
- Vous orienter vers la phase d'implémentation de vos model explicative de maintenance en vous adaptant à l'utilisation du matériels

En termes de savoir-être, vous sensibiliser au respect des exigences d'un

- commanditaire (spécificités du système, contraintes de fonctionnement, ...).

### **Objectifs généraux**

- Identifier les paramètres microstructuraux des états de surface ;
- Choisir une structure donnée pour répondre à une exigence industrielle donnée.

### **Objectifs spécifiques**

Au terme de ce cours, l'apprenant sera en mesure de :

- Définir les types de rugosité qui sont susceptibles d'être analysé ;
- Définir les conditions de certains paramètres de surface ;
- Préparer et utilise les théories de déformation élastoplastique des aspérités ;
- Traiter les alliages.

### **Activités d'enseignement-apprentissage**

Afin que vous puissiez assimiler les concepts de ce cours et concevoir un système tribologique, le cours propose plusieurs méthodes ayant leurs spécificités et leurs avantages.

### **En présentiel :**

- Les savoirs sont transmis à travers un cours magistral, j'attends de votre part une prise de note qui vont vous servir à maîtriser les concepts indispensables à la réalisation des activités d'apprentissage proposées pendant la séance.
- Vous êtes également invités à participer à des débats, initiés par des questions posées sur la séquence pédagogique en cours, sans aucune forme d'évaluation, dans le but de développer des échanges entre vous, je vous invite à participer librement à ces débats

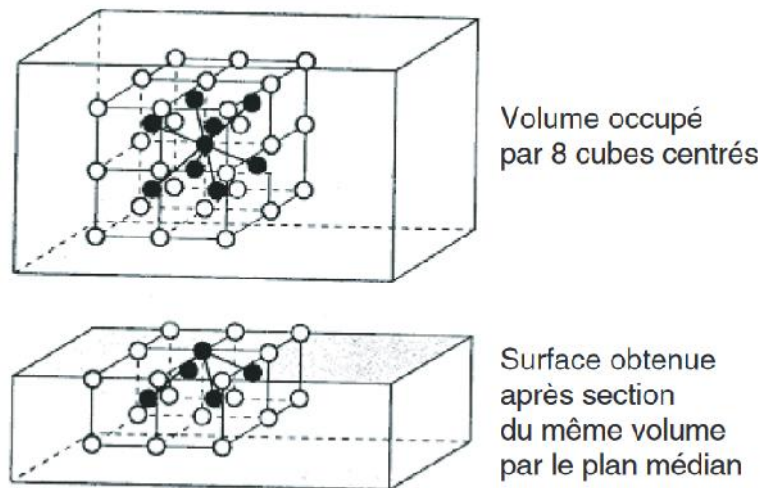
en proposant des réponses aux questions posées afin de mobiliser vos connaissances, de comparer vos points de vue et d'en tirer des bénéfices pédagogiques de ces échanges.

- Des travaux pratiques sont programmés à la fin de chaque chapitre afin que vous puissiez vérifier votre capacité à mobiliser les savoirs dans la résolution des exercices et les problèmes proposés.
- Des projets individuels vous seront proposés, ils vous permettront de développer votre autonomie et votre réflexion quant à la conception des systèmes réels en utilisant l'équipement présent.
- Des projets collectifs sont également proposés permettant de travailler sur les nouveaux circuits utilisés dans les différents systèmes notamment dans le domaine transport et le traitement thermique des métaux, le projet collectif va vous aider à développer vos compétences quant au travail d'équipe qui vous permet d'échanger vos idées afin d'assurer la qualité de votre production et de développer des aptitudes de collaboration qui seront utiles dans votre vie professionnelle.

## Chapitre 1 : Mécanique des surfaces

### I. Structure des surfaces :

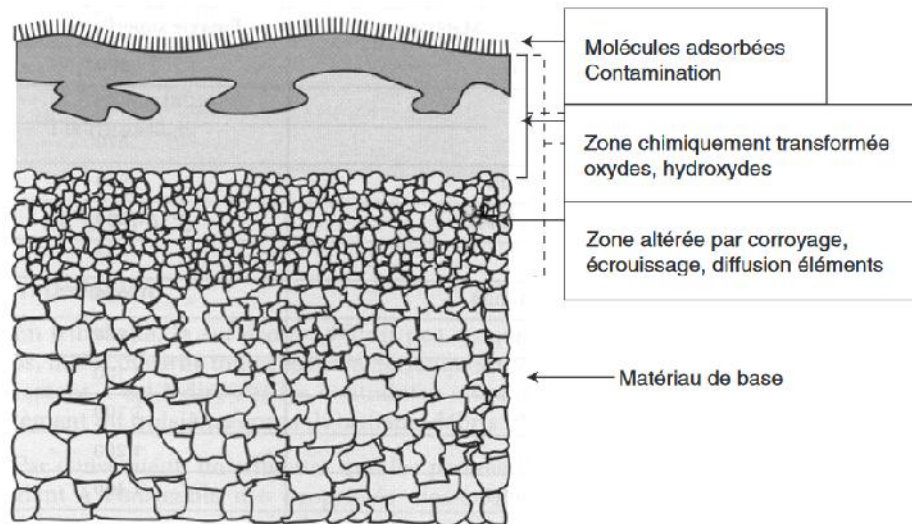
La surface d'un corps correspond à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de ce dernier; en surface, le nombre des plus proches voisins d'un atome est plus faible qu'en volume, comme le montre la figure 1.



**Figure 1** – Proches voisins d'un atome dans la structure cubique centrée : en volume (partie supérieure) et en surface (partie inférieure).

Dans cet exemple en effet, si l'on coupe le cristal par un plan  $\{100\}$  passant par le sommet commun à huit cubes adjacents, le nombre de plus proches voisins qui sont au centre des cubes passe de huit à quatre. Pour rétablir l'équilibre des champs de force auxquels ils sont soumis, les atomes de la surface vont avoir tendance à échanger des liaisons nouvelles avec les plus proches voisins, soit en surface, soit dans le volume sous jacent, soit avec des atomes, des molécules ou même des espèces ionisées du milieu environnant. Il en résulte une grande réactivité des atomes de surface qui va dépendre de l'orientation de cette surface.





**Figure 2** – Représentation schématique de l'état structural et analytique d'une surface après préparation par différentes méthodes.

## II. Critères fonctionnels des surfaces industrielles

### II.1 Critères physico-chimiques

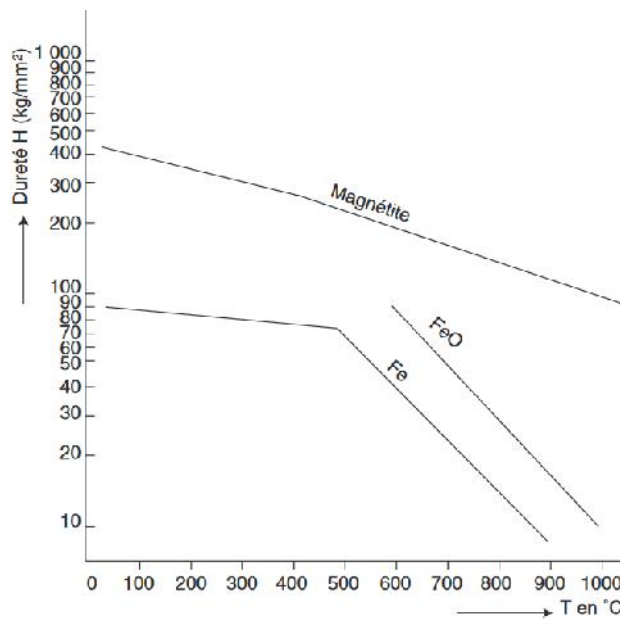
Les caractéristiques physico-chimiques des surfaces, liées à la présence de couches adsorbées et d'une sous-couche que l'on peut regrouper sous le nom de films superficiels jouent un rôle fondamental sur de nombreux phénomènes de dégradation des surfaces comme l'usure ou la corrosion. La formation de ces films superficiels est liée à des critères chimiques, comme la cinétique d'oxydation, les possibilités de réaction avec des films de polymères, des lubrifiants, ainsi que les affinités entre éléments d'alliages constituant les deux surfaces antagonistes.

#### II.1.1 Critères chimiques

Une surface métallique a des propriétés spécifiques liées, soit à la présence de couches superficielles à caractère ionique ou covalent (oxyde, film de nature organique), conséquence de la gamme de fabrication du produit, soit à l'existence d'hétérogénéités dans la composition chimique superficielle comme la précipitation d'impuretés dans les joints de grains, les ségrégations d'éléments résiduels.

La cinétique d'oxydation est également un critère associé à la réactivité chimique de la surface métallique. Le critère important dans ce cas est l'ensemble des caractéristiques rhéologiques des couches d'oxydes en fonction de la température. Certains oxydes peuvent se comporter comme de véritables lubrifiants, et protéger la surface métallique contre toute

dégradation par usure. C'est par exemple le cas de l'oxyde de fer FeO à la différence de la magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> qui est dure et fragile, comme le montrent les courbes de la figure 3.



**Figure 3** – Dureté des oxydes de fer en fonction de la température.

### II.1.2 Critères physiques

Les critères physiques les plus représentatifs d'une surface métallique sont la conductivité thermique et le pouvoir réflecteur. Ces critères sont déterminants, le premier pour évacuer un flash thermique au sein du matériau en réduisant ainsi le gradient de température et le second pour limiter l'impact de ce même flash thermique dans le matériau. A titre d'exemple, un faisceau laser sera parfaitement réfléchi par une surface métallique d'acier inoxydable poli et il n'y aura pratiquement pas d'interaction laser matière. Le pouvoir réflecteur est par ailleurs un critère majeur dans tous les domaines d'application où la perception visuelle du matériau fait partie des critères de choix, comme en architecture ou dans l'industrie auto mobile. Une bonne conductivité thermique permettra d'évacuer plus facilement un apport de calories dans l'outillage lors de la mise en œuvre de matières plastiques.

### II.2 Critères mécaniques

#### Résistance mécanique

Il s'agit de la rigidité et de la ténacité des irrégularités géométriques de la surface définies précédemment. En effet, la capacité de déformation des motifs de rugosité peut avoir une incidence favorable pour des conditions de lubrification hydrodynamiques (rodage d'une surface), en augmentant la surface de contact et en diminuant la charge unitaire d'application. Par contre, la déformation des motifs de rugosité peut favoriser les phénomènes d'adhésion en l'absence de lubrification ou dans des conditions de lubrification « limites » qui n'empêchent pas le contact métallique entre surfaces antagonistes.

### **Contraintes résiduelles**

Il s'agit également d'un critère déterminant pour le comportement d'une surface sollicitée mécaniquement. Il s'agit des contraintes existant dans une pièce en l'absence de toute contrainte extérieure, dont l'origine est liée à la préparation de la pièce. Ces contraintes résiduelles peuvent être de compression après un traitement de mise en forme à froid, de déformation plastique superficielle (grenailage par exemple), après un traitement thermique ou thermo-chimique, elles seront dans ce cas plutôt favorables sauf si la surface est soumise à de fortes charges d'application auquel cas il peut y avoir risque de rupture des motifs de rugosité par compression. Ces contraintes peuvent être également de tension dans des conditions d'usinage mal adaptées (par exemple une rectification sévère) ou lors d'opérations de soudage et de rechargements mettant en jeu de forts gradients thermiques. Elles seront dans ce cas plutôt défavorables, notamment pour l'amorçage de fissures de fatigue (mécanique ou thermique) dans les creux des motifs de rugosité, zones où se concentrent les sollicitations mécaniques.

## **II.3 Critères métallurgiques**

### **Structure cristallographique**

La nature du réseau cristallin est un paramètre important. Par exemple, les mesures du coefficient d'adhésion de différents métaux sur eux mêmes ont conduit au classement suivant par ordre décroissant d'aptitude à l'adhésion : – systèmes cubiques à faces centrées, – systèmes cubiques centrés, – systèmes hexagonaux....etc. Dans ce dernier cas, les conditions d'adhésion peuvent être minimisées lorsque le rapport des paramètres cristallins  $c/a$  est proche de 1,633 qui caractérise le système hexagonal compact.

### **Effet de l'environnement**

Aux critères métallurgiques précédemment définis, peuvent être associés les problèmes environnementaux comme l'atmosphère gazeuse (qui régit la corrosion sèche ou l'oxydation), le fluide en contact avec la surface (solution aqueuse ou lubrifiant) qui contribue à la corrosion, la température et les contraintes appliquées qui vont contribuer à augmenter la sévérité des phénomènes précédemment décrits.

## **II.4 Mécanique du contact lisse et rugueux**

Le contact entre surfaces rugueuses s'effectue à la pointe des sommets les plus élevés lorsque la pression de contact est faible. De ce fait, l'aire réelle de contact est une fraction de l'aire apparente, La présence de la rugosité affecte le comportement à l'interface en termes d'effort, aire réelle de contact et raideur de contact. La prédiction de ces quantités est déterminante afin d'évaluer la résistance à l'usure, le transfert de l'énergie et l'étanchéité entre les deux corps en contact.

### **Etat de surface**

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections. Les défauts peuvent être de forme défauts macro-géométriques (ondulations) ou de petits défauts défauts micro-géométriques désignés plus communément sous le nom de rugosité.

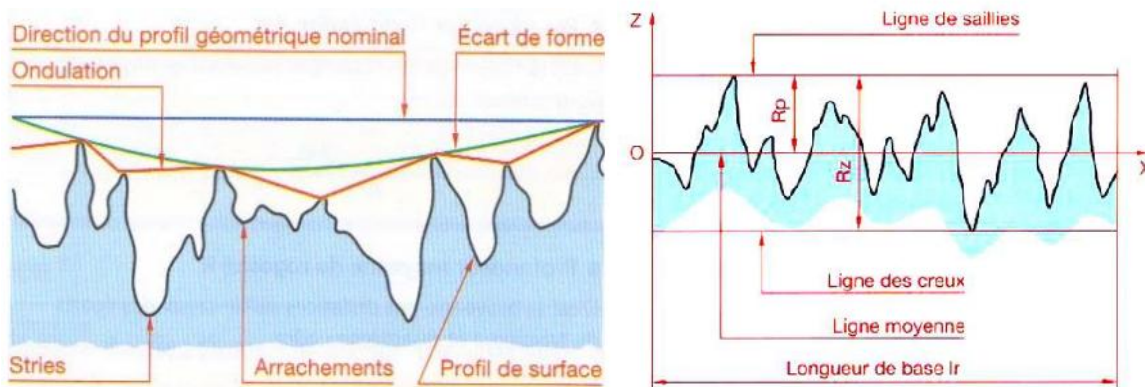
### **Défauts de rugosité**

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces. L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que : - le frottement de glissement et de roulement, - la résistance à l'écoulement des fluides, - la facilité d'accrochage des revêtements, - la résistance aux efforts alternés.

## **II.5.1 Les paramètres de la rugosité**

Rugosité  $R_z$  : Hauteur maximal du profil Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux  
Rugosité  $R_a$  : Écart moyen arithmétique du profil. Correspond à la moyenne des valeurs absolues des écarts entre le profil et une ligne moyenne de ce profil.

Remarque : valeurs exprimées en  $\mu\text{m}$



**Figure 4 – Présentation d'une surface microscopique.**

Une coupe longitudinale ou transversale d'une surface réelle donne un profil sur lequel on relevé des défauts de plusieurs ordres de grandeur

Les défauts sont : - Défauts de 1er ordre : Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.) Provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes de la machine-outil.

- Défaut de 2ème ordre : Défauts plus petits ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tournage ou en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil.

- Défauts de 3ème ordre : Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence.

- Défauts de 4ème ordre : Fentes et piquûres dues à des marques d'outil ou à des vibrations hautes fréquence.

L'ensemble des défauts de 3ème et 4ème ordre constituent la rugosité de la surface.