

CHAPITRE II

SURFACES ET CONTACTS

II.1. Etude des surfaces

L'étude des surfaces couvre un grand nombre d'applications industrielles.

Deux types de sciences en proposent une approche: la physique des surfaces et des solides et la physico-chimie.

II.2. Définition d'une surface

Elle est constituée par l'ensemble des points qui délimitent la portion de l'espace où se trouve la matière de ce corps.

II.3. Structure d'une surface

Elle est caractérisée par sa structure physico-chimique et par sa géométrie. Une surface usinée est une zone complexe qui recouvre la masse du solide comme une peau. Ses propriétés, différentes de celle du corps du solide, jouent un rôle fondamental dans le comportement tribologique d'un couple cinématique. Une surface possède également une épaisseur, qui s'étend de l'extérieur jusqu'à l'intérieur du solide. La figure II.1 illustre ce concept d'une façon schématique.

A l'extérieur du solide (surface extérieure), les atomes possèdent des valences non saturées créant ainsi un champ de force électrostatique. On retrouve inévitablement une couche d'oxyde sur le solide. Même des matériaux nobles comme l'or ou le platine forment une couche d'oxyde sur leur surface dans l'atmosphère. L'épaisseur et les propriétés mécaniques de la couche

d'oxyde varient selon le matériau et le temps d'exposition à l'atmosphère. Cette couche d'oxyde joue un rôle important dans le frottement et l'usure de la surface, sans celle-ci, tous les matériaux se soudent les uns aux autres et les pièces en mouvement relatif grippent.

Sur la couche d'oxyde se trouve une couche adsorbée: eau, hydrocarbure gazeux ou liquide, azote, oxygène et toutes sortes d'autres composants qui se trouvent dans l'environnement immédiat de la surface et peuvent réagir avec le métal pour former des oxydes ou y diffuser. L'adsorption d'huile ou de graisse joue un rôle intéressant en lubrification. La couche adsorbée est très tenace, elle isole le métal de tout contact direct.

Sur la couche écrouie existe souvent une couche métallique amorphe, ou de cristaux concassés, appelée couche de Bielby (1921) comme l'indique la figure II.1. Elle est produite par la fusion du métal puis son autotrempeage par la masse froide voisine lors des opérations de finition telles que rectification et polissage. Cette couche, épaisse de quelques dizaines d'angströms.

En profondeur, en partant des aspérités, on trouve une couche de matériau plus ou moins écrouie. Le degré d'écrouissage et la profondeur de la couche écrouie dépendant du procédé de fabrication de la pièce, que ce soit par formage (forgeage, filage...), ou par enlèvement de copeaux (tournage, fraisage, brochage...).

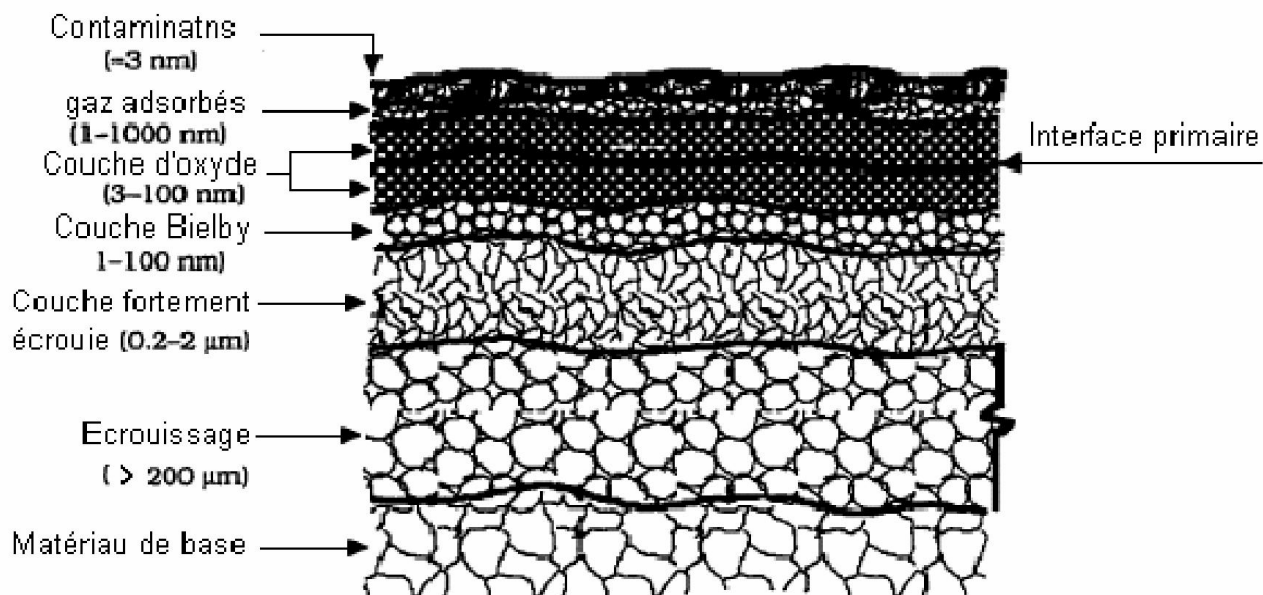


Figure II.1 : Composition schématique des couches superposées d'une surface.

II.4. Types des surfaces

II.4.1. Surface géométrique

C'est la surface parfaite, idéale. Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

II.4.2. Surface spécifiée

Elle résulte de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit des limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

II.4.3. Surface réelle

C'est celle qui est obtenue au cours de la fabrication.

II.4.4. Surface mesurée

Elle résulte de l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure. Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique, de mesure appliquée, de la précision de l'instrument de mesure utilisé et de la nature même de la surface réelle.

L'intersection de la surface réelle avec un plan perpendiculaire à la surface géométrique qui lui correspond s'appelle profil, comme indique la figure II.2.

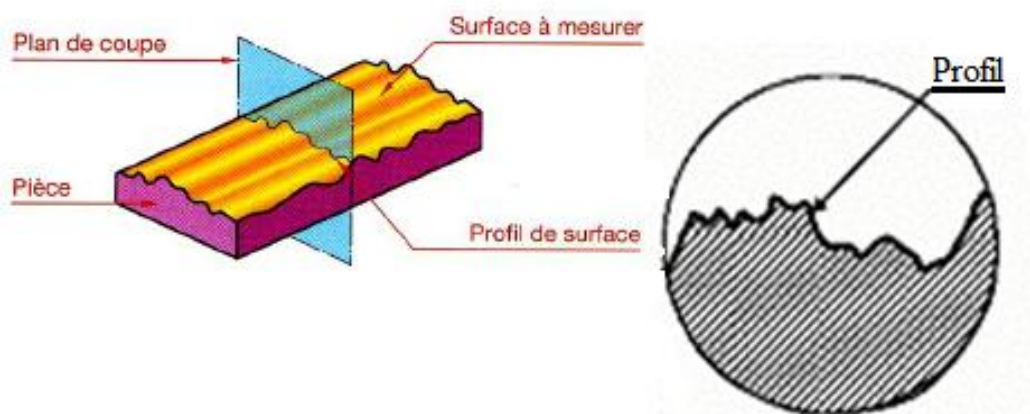


Figure II.2 : Profil d'une surface.

Le profil agrandi de la surface montre les défauts indiqués sur la figure II.3.

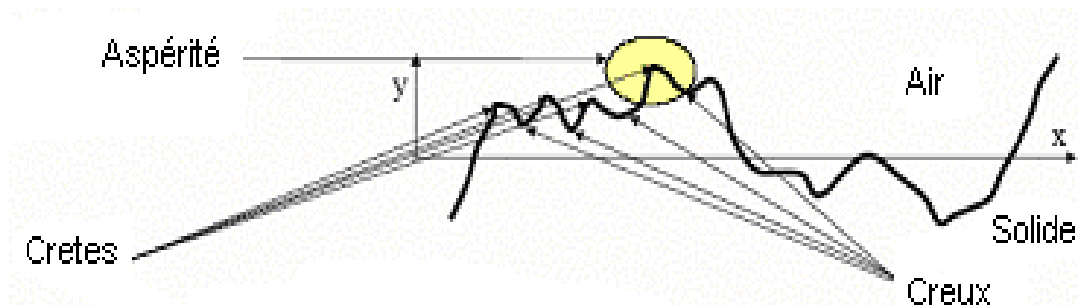


Figure II.3: Défauts de profil d'une surface.

II.4.5. Ordres de défauts d'une surface géométrique

On sait que les cotes dimensionnelles des pièces sont sujettes à tolérances, mais les surfaces proprement dites sont aussi affectées par des irrégularités qui jouent un grand rôle dans le fonctionnement des mécanismes.

II.4.5.1. Défaut d'ordre 1 (défauts de forme)

Les défauts de forme ou erreurs macro géométriques, dites de premier ordre, proviennent des déformations de la pièce lors de l'usinage, telles que les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité.

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.

II.4.5.2. Défaut d'ordre 2 (défauts d'ondulation)

Les irrégularités du deuxième ordre (figure. II.4) consistent en ondulations régulières engendrées par des vibrations de la pièce ou de la machine-outil et traitements thermiques les ondulations sont apparentes à l'œil nu.

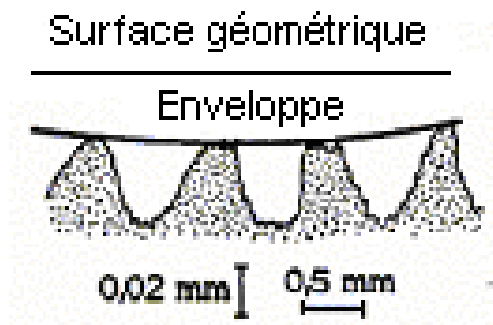


Figure II.4: Défauts d'ondulation.

II.4.5.3. Défaut d'ordre 3

Ce sont les stries de rugosité, sortes de sillons tracés avec régularité dans le relief des ondulations par les outils de coupe.

II.4.5.4. Défaut d'ordre 4

Plus irrégulières, parfois accidentels, ils correspondent à des arrachements, fissures...

II.4.6. Caractérisation topographique des surfaces

La topographie des surfaces a une grande influence sur les propriétés d'un système tribologique. Elle couvre un large domaine allant du niveau micrométrique au niveau nanométrique.

II.4.7. Mesure de la rugosité

II.4.7.1. Ecart quadratique moyen du profil (R_q)

Valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base (figure II.5).

$$R_q = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

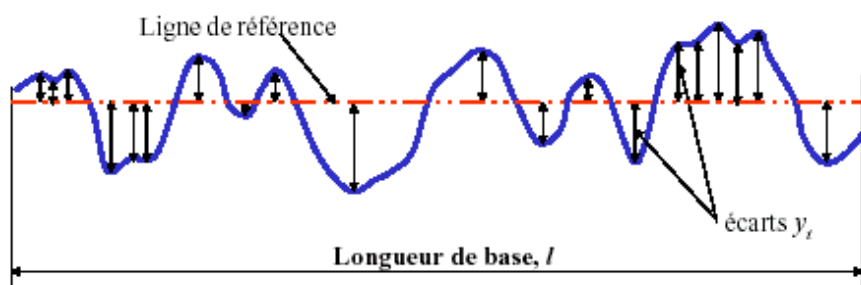


Figure II.5: Ecart quadratique moyen.

II.4.7.2. Ligne de référence arithmétique (ligne centrale)

Ligne de référence divisant le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (figure II.6) les sommes des aires des solides et des vides compris entre celle-ci et le profil soient identiques.

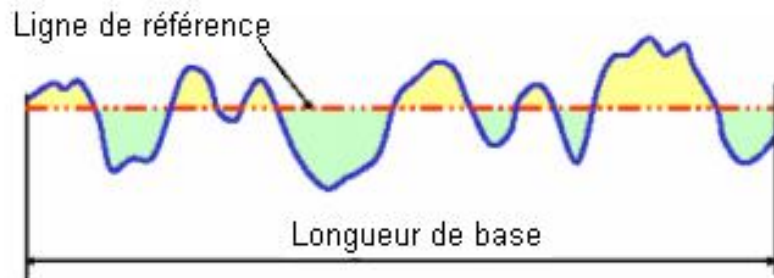


Figure II.6 : Ligne de référence arithmétique.

II.4.7.3. Ecart arithmétique moyen du profil (R_a)

Est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil par rapport à la ligne de référence arithmétique à l'intérieur de la longueur de base (figure II.7).

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i|$$

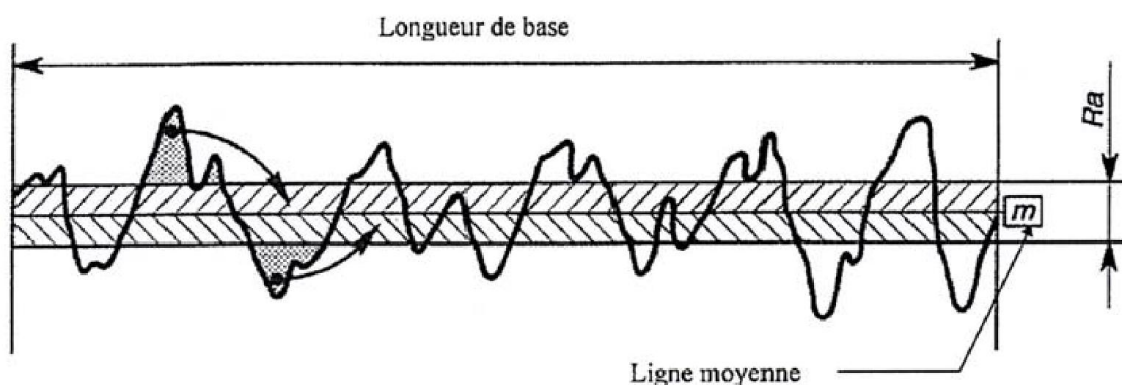


Figure II.7 : Ecart arithmétique moyen du profil R_a .

II.5. Critères de déformation

II.5.1. Contact sur une aspérité

Quand deux solides sont en contact, ils se touchent par le sommet de leurs aspérités. Ils feront d'abord contact par une aspérité. Au début du contact, $N=0$ et les deux aspérités vont tout simplement s'effleurer et se touchent par un point ou une ligne (figure II.8).

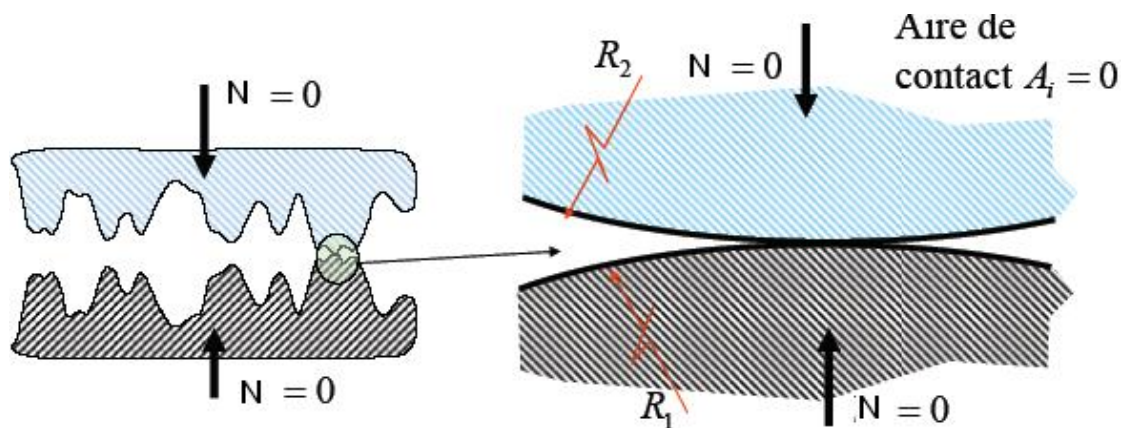


Figure II.8 : Contact sur une aspérité.

II.5.2. Déformation élastique de la surface de contact

La déformation élastique repose sur les hypothèses suivantes :

- Les solides sont soumis à de petites déformations sans dépasser leur limite.
- Les surfaces sont continues et non conformables.
- La déformation élastique est calculée en admettant que chaque corps en contact est un demi-espace élastique.
- Les surfaces sont sans frottement, les composantes de la force tangentielle dans le plan du contact sont nulles.

Les dimensions de l'aire de contact, par exemple le rayon a , sont petites par rapport au rayon de courbure des surfaces ($a \ll R$) (figure II.9).

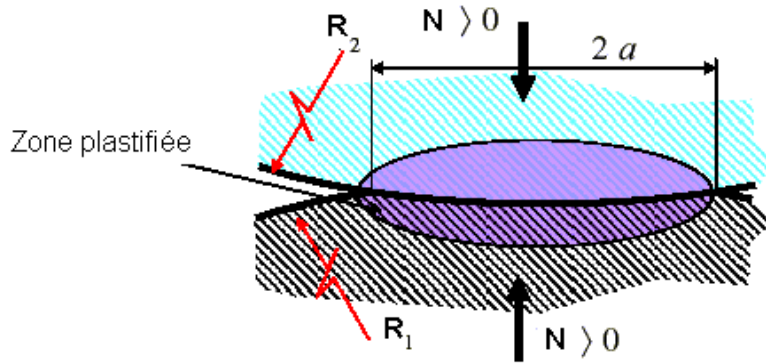


Figure II.9 : Déformation élastique de la surface de contact.

II.5.3. Contact extérieur entre deux sphères

Soit R_1 et R_2 les rayons de deux sphères (figure II.10), E_1 et E_2 les modules d'élasticité et ν_1, ν_2 les coefficients de poisson de leurs matériaux.

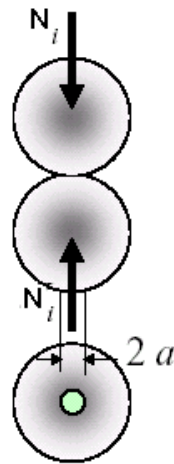


Figure II.10 : Contact extérieur de deux sphères.

La surface de contact est un cercle de rayon

$$a = \sqrt[3]{\frac{3N}{2E} \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}}$$

On a posé pour alléger l'écriture, le module d'élasticité réduit :

$$E = 2 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$$

Les centres de sphères chargées par une force F se rapprochent de:

$$f = \sqrt[3]{\frac{9}{16} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) F^2}$$

Pour des matériaux dont le coefficient de poisson vaut 0.3 :

$$f = 1,231 \sqrt[3]{\frac{F^2}{RE^2}}$$

Avec le rayon réduit :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Dans le cas particulier d'une bille de rayon R_1 sur un plan, $R_2 = \infty$ et $R = R_1$.

On tire la force en fonction de la déformation :

$$F = \frac{E\sqrt{R}}{1.365} f^{\frac{3}{2}}$$

La pression hertzienne, au centre du cercle de contact:

$$P_0 = \frac{3F}{2\pi a^2} = 0,3644 \sqrt[3]{E^2 F \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^2}$$

P_0 est aussi la contrainte maximale σ_{zz} comme indique la (figure II.11a).

On utilise aussi souvent le concept de pression moyenne σ_m sur la surface de rayon a (figure II.11b).

$$\sigma_m = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{2}{3} \sigma_{zz}$$

Dans le cas du contact d'une sphère de rayon R et d'un plan de rayon infini, la pression est :

$$P_0 = 0,3644 \sqrt[3]{\frac{E^2 F}{R^2}}$$

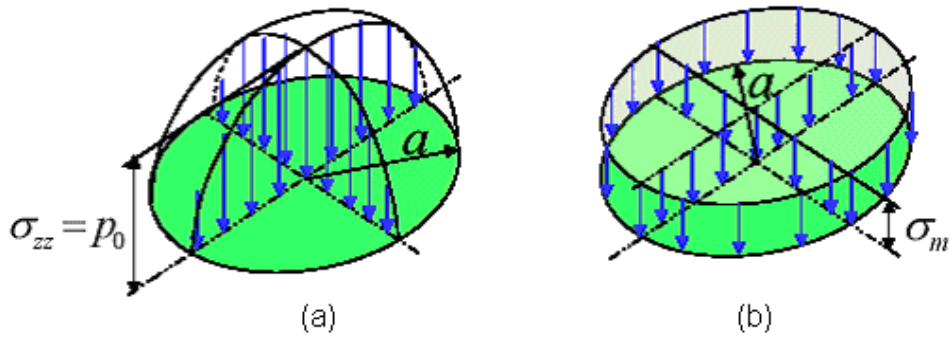


Figure II.11 : Distribution des contraintes: (a)Contrainte maximale ;(b) Pression moyenne.

II.5.4. Contact extérieur de deux cylindres parallèles

La surface de contact est un rectangle de longueur L (longueur du cylindre le plus court) et de demi-largeur b (figure II.12).

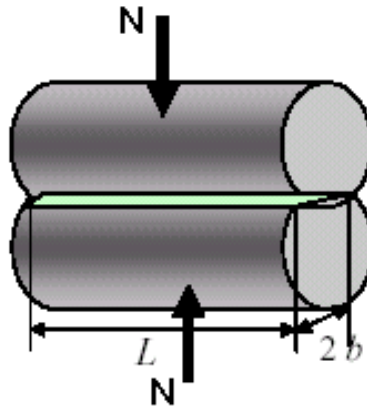


Figure II.12 : Contact extérieur de deux cylindres parallèles.

L'aire de contact A $A = 2bL$

La largeur b $b = \sqrt{\frac{8F}{\pi \cdot E \frac{1}{R}}}$

La pression hertzienne sur l'axe du rectangle de contact vaut :

$$P_0 = 0,3979 \sqrt{\frac{F}{l} E \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

$P_0 = \sigma_{zz}$ (la contrainte maximale)

La contrainte moyenne est : $\sigma_m = \frac{F}{2bL} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{F' \pi E}{R}}$

Avec $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ $F' = \frac{F}{L}$ est la charge par unité de longueur reprise par l'aspérité.

II.5.5. Contact du cylindre sur un plan

La déformation ne peut pas se calculer par la théorie de Hertz. Palmegreen donne un résultat empirique pour de l'acier :

$$f = 1,53 \times 10^{-10} \frac{F^{0,9}}{b^{0,8}} \quad [\text{m}]$$