

## Cours 3 : Mécanismes de défaillance

**I – MECANISMES DE DEFAILLANCE :**

Les défaillances en service des pièces mécaniques appartiennent à quelques familles ou « modes de défaillance » ayant leur processus de dégradation propre.

**1 – Défaillances mécaniques dues à la santé matière :**

Il s'agit de défauts préexistants dans les pièces en service, et à l'origine d'initiations de défaillances lorsqu'ils ne sont pas détectés lors des contrôles de qualité. Les défauts apparaissent lors de l'élaboration de la pièce (forgeage, fonderie, etc.), lors de la mise en forme de la pièce (usinage, soudures, traitements thermiques, etc.) et lors du montage (ex : choc sur roulement).

**1.2 – Défaillances mécaniques en charge :**

**Choc :** il s'agit le plus souvent « d'accidents » de conduite ou de manipulation.

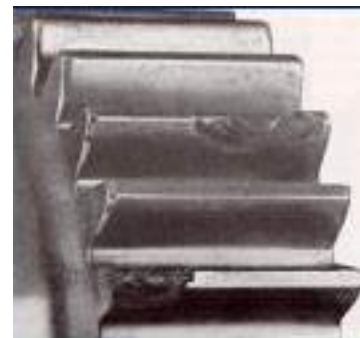
**Surcharge :** dépassement de la charge nominale entraînant une déformation permanente ou une rupture (traction, flexion, etc.). →

Elle résulte généralement d'une fatigue des dents causée par les efforts continuellement répétés après un temps de fonctionnement plus ou moins long. La rupture peut aussi être causée par un fragment de métal introduit accidentellement dans la zone d'engrènement. Elle peut aussi résulter d'une trempe défectueuse, d'une mauvaise répartition des charges, etc.



**Fatigue :** c'est quand une pièce a atteint sa limite d'endurance. Il s'agit d'efforts (vibrations) alternés et répétés entraînant une rupture, même en dessous de la limite élastique du matériau. →

**Fatigue thermique :** c'est une fatigue engendrée par des contraintes thermiques. Elle entraîne dilatations, déformations plastiques, brûlures ou fusion.



## Cours 3 : Mécanismes de défaillance

**Déformations plastiques sous contrainte mécanique :** dues à un dépassement de la limite élastique du matériau. Une inspection des pièces vérifiant l'apparition d'une zone de striction peut prévenir le risque d'une rupture prochaine.



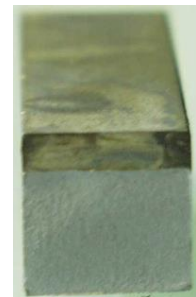
**Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps :** c'est le fluage qui est une déformation devenant permanente avec le temps apparaissant sous contraintes mécaniques associées à des températures de service inférieures à 40% de la température de fusion.

*Ex : un avion gros porteur venant de franchir l'Atlantique ne repartira pas aussitôt vers une autre destination. Il sera en grande partie démonté. Cette sérieuse révision est nécessaire parce que les différentes pièces métalliques de l'avion sont sujettes à la [fatigue](#) et au fluage. C'est le cas par exemple des pales des [turbines](#) de réacteurs. Dès que le moteur commence à tourner, des pales sont exposées à de fortes pressions, au milieu de gaz très chauds. Cet effort constant et la [chaleur](#) ont pour effet, à la longue, de faire glisser les uns sur les autres les [atomes](#) du métal et d'affaiblir ce dernier. Les [alliages](#) spéciaux résistent longtemps aux hautes températures et aux efforts constants. Mais tôt ou tard le fluage se manifeste. C'est pourquoi les moteurs d'avion sont révisés après un certain nombre d'[heures](#) de vol.*

**Rupture ductile :** elle provient après une phase de déformation plastique appréciable, allongement du matériau et striction au niveau de la rupture. Ductile se dit d'un matériau qui peut être étiré sans se rompre. Ductile s'oppose à fragile.



**Rupture fragile :** elle survient après une très faible déformation plastique. Elle est souvent l'effet d'un choc et est favorisée par la fragilité intrinsèque du matériau. Fragile se dit d'un matériau qui se casse facilement (cas du verre). Fragile s'oppose à ductile.

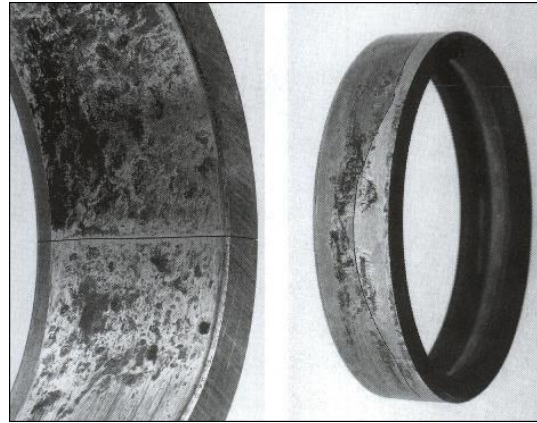
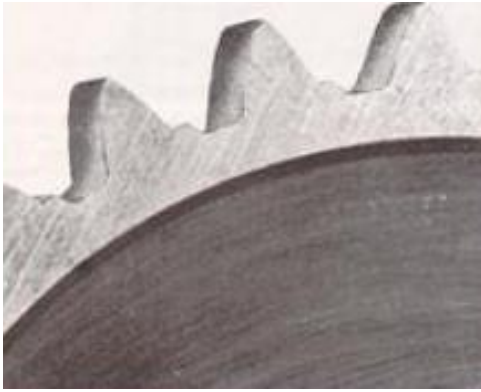


### **13 – Défaillances mécaniques par détérioration de surface : fatigue et usure :**

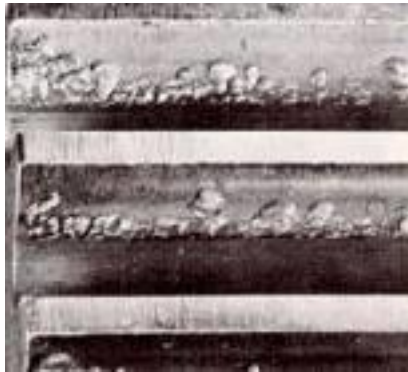
**Usure :** enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.

**Fretting-corrosion :** usure particulière apparaissant au contact de 2 pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements oscillants (vibrations). C'est le cas des pièces frettées ou des clavetages.

Cours 3 : Mécanismes de défaillance

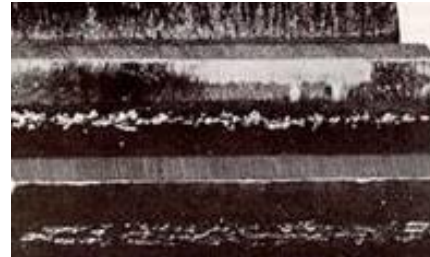


**L'écaillage** : enlèvement de grosses écailles de matière.



Il apparaît sur les dentures cémentées ou trempées, à l'intérieur du métal, entre la partie traitée et non traitée. Les causes possibles sont une épaisseur insuffisante de la couche traitée ou une transition trop brusque de la dureté entre couche traitée et non traitée.

**Grippage** : soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière.



Il résulte de la rupture du film de lubrifiant dans la zone d'engrènement. Il se produit lorsque les charges et les vitesses de glissement sont élevées ou lorsque la lubrification est mal choisie.

**Abrasion** : une surface est rayée par un corps (surface ou particule libre) de dureté supérieure tels que des impuretés ou de déchets (poussières, sable, etc.).



**Cavitation** : implosion de micro bulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression au sein d'un liquide. L'onde de choc génère des cratères dans la zone de cavitation (pompes, hélices, etc.).



## Cours 3 : Mécanismes de défaillance

**Rayage** : trace laissée par le passage d'un corps dur.



**Erosion** : une surface est rongée sous l'effet de l'impact de fluides ou de particules solides en suspension à grandes vitesses ( $E_c = \frac{1}{2} mV^2$ ), ou de phénomènes électriques (arcs).

**Faïençage** : réseau de craquelures superficielles dues à la fatigue thermique

**Marquage** : enfoncement localisé dû à une charge ponctuelle

**Roulement et fatigue de contact** : roulements à billes et à aiguilles se détériorent intrinsèquement par fatigue de contact. La pression de Hertz au contact bille / chemin de roulement fait apparaître des contraintes de cisaillement sur les bagues entraînant des fissures en surface puis débouchantes (piqûres).



## Cours 3 : Mécanismes de défaillance

**II- FROTTEMENT ET USURE :**

L'usure est le propre des systèmes mécaniques. Elle est la conséquence du frottement entre 2 organes en mouvement l'un par rapport à l'autre. Elle est fonction des matériaux en présence, de la pression exercée, de la nature du contact et de la durée.

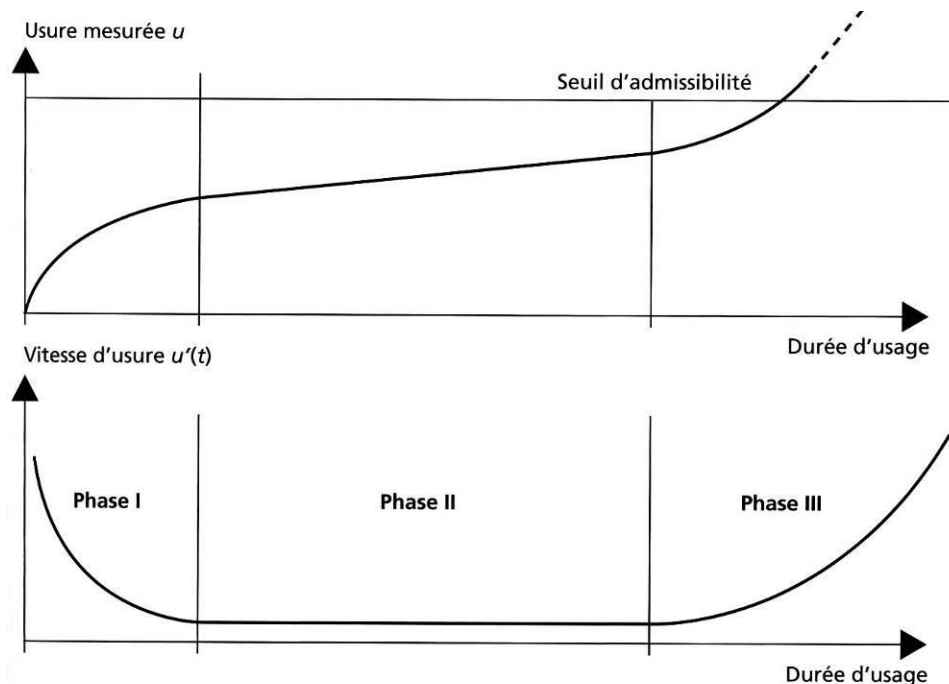
A plus ou moins long terme, en fonction des paramètres précédents, un frottement provoque un échauffement local et c'est l'élévation de température produite qui va accélérer la dégradation.

Concrètement, l'usure, avec ses 2 composantes (l'érosion et l'abrasion), entraîne une micro-détérioration de surface par arrachement de particules. Cette atteinte se traduit par une modification dimensionnelle, géométrique et structurale entraînant principalement une augmentation des jeux fonctionnels. Par accélération de la dégradation par usure des composants en présence, ces altérations peuvent aller jusqu'à la rupture en passant par des phases intermédiaires dangereuses comme l'augmentation des vibrations.

L'usure entraîne donc une perte de matière des surfaces en contact. Ce mode de défaillance est inexorable dès lors que 2 surfaces en contact ont un mouvement relatif. La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes.

**Dynamique de l'usure des lois de dégradation :**

L'usure est progressive mais non constante. Elle se décompose en 3 phases présentant chacune une allure différente :



A partir de 2 surfaces initiales :

- **Phase I** : c'est le rodage au cours duquel l'usure est relativement rapide. A l'examen microscopique, les surfaces présentent des irrégularités qui sont arasées jusqu'à l'obtention d'une surface portante correspondant à un équilibre entre dureté des matériaux et pression. Cette phase inévitable peut être diminuée dans le temps par un pré-rodage avant utilisation.

## Cours 3 : Mécanismes de défaillance

- **Phase II** : représentative d'une usure naturelle, stable et linéaire dans le temps. L'usure est reportée principalement sur l'une des surfaces de contact. Elle est ralentie par la lubrification (huile ou graisse) ; d'où une prolongation de cette phase d'usage.
- **Phase III** : période de dégradation accélérée. Au cours de cette phase, l'usure des surfaces en présence s'accélère sous l'action de plusieurs phénomènes conjugués : amplification des jeux fonctionnels (vibrations, broutage, chocs, etc.), altération des traitements de surface destinés à augmenter la dureté superficielle, vieillissement de la matière par modification structurale par effet d'échauffements répétés. Cette phase, dite phase d'usure catastrophique consiste en des émissions particulières. Ces débris engendrant un labourage de la surface la plus tendre et une dégradation rapide. L'analyse des lubrifiants met en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées.

**Prévention contre l'usure**

Il y a 4 moyens pour prolonger la **phase II** d'usure normale et d'exploitation : le graissage et la lubrification, l'emploi de matériaux antifriction, les traitements thermiques et revêtements de surfaces, les règles technologiques.

**Graissage et lubrification :**

Le graissage et la lubrification sont les moyens les plus simples d'application et aussi les plus économiques. Cependant, ils imposent une attention permanente et continue et supposent, dans certains cas, un accès aux organes à lubrifier.

Par l'interposition d'un film à faible coefficient de frottement entre les organes en mouvement, le graissage et la lubrification assurent 4 fonctions

- diminution du frottement et donc limitation de l'érosion,
- évacuation des particules favorisant l'abrasion,
- évacuation de la chaleur provoquée par le frottement,
- isolation du milieu ambiant pouvant induire de la corrosion.

**Les matériaux antifriction :**

Il en existe plusieurs sortes. Les plus répandus sont les alliages cuivreux : le bronze (cuivre-étain), le laiton (cuivre-zinc), le maillechort (cuivre-nickel-zinc). Avec parfois une addition de cadmium et/ou d'antimoine, ces alliages sont dotés d'un coefficient de frottement relativement faible atténuant ainsi le phénomène de l'usure.

Les céramiques qui sont des oxydes, des carbures ou des nitrures, ont des qualités de dureté, de résistances aux températures extrêmes et de résistance chimique. Elles sont un moyen efficace pour lutter contre l'abrasion, l'usure à toutes températures et la corrosion.

Les matériaux frittés, dont les plus utilisés sont les frittés à base de cuivre ou de fer, peuvent être imprégnés d'huile. Qualifiés alors **d'autolubrifiants**, les particules qui les composent se dilatent lors de l'échauffement crée par le frottement et expulsent l'huile qu'ils contiennent. Lors du refroidissement, par effet inverse, ils aspirent l'huile en leur structure.

Les matériaux composites permettent des frottements dits secs grâce à leur excellente résistance au grippage. Ils résistent désormais de mieux en mieux aux

## Cours 3 : Mécanismes de défaillance

sollicitations mécaniques. On peut ainsi les utiliser pour l'élaboration de pièces complexes. Un matériau composite peut être constitué d'une matière présentant d'excellentes caractéristiques mécaniques à cœur pour la résistance et rigidité de la pièce et en périphérie d'une autre matière améliorant le comportement face au frottement.

Les plastiques tels que le PTFE (polytétrafluoroéthylène), PA (polyamides), polyimides, Téflon, PVCU (polychlorure de vinyle rigide), permettent, entre autres par leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût, la construction de toutes sortes de pièces comme des engrenages, des aubes de pompes, des axes, etc.

**Les traitements de surface et revêtements de surface :**

Les traitements et revêtement de surface visent essentiellement à augmenter la dureté superficielle d'une pièce.

Les traitements de surface tels que, la cémentation, la trempe superficielle, la nitruration, la chromisation dure, le chauffage par induction sont des procédés thermiques relativement simples à mettre en œuvre et d'une efficacité très convenable.

D'autres traitements, plutôt mécaniques, comme le sablage, le grenailage, le microbillage, le martelage, le galetage offrent également un accroissement de la résistance à la fatigue par le ralentissement de la formation de fissures.

L'usinage pur et simple, parce qu'il crée un écrouissage superficiel, améliore lui aussi la résistance à l'usure.

Les revêtements de surface comme la sulfuration, le placage, permettent d'obtenir des surfaces d'une plus grande plasticité sans altération de la résistance à l'usure. Bien que généralement plus complexes que les traitements précédents, ils offrent l'avantage de permettre le dépôt de métaux purs (aluminium ou titane → qui agissent aussi contre le vieillissement ; tantale, chrome, cadmium, etc.) ainsi que celui d'alliages ou de composés métaux-métalloïdes (nitride de titane, carbure de silicium, alumine, sulfate manganéux, etc.). De plus, de nombreux types de support peuvent en bénéficier : aciers, alliages légers, alliages cuivreux, mais aussi des matériaux aussi différents que le verre ou les plastiques.

Une surface métallique peut également être revêtue de matériaux antifriction comme les PTFE, le nylon ou encore le Téflon.

**Les règles technologiques :**

L'importance du frottement est d'autant moins grande que les matériaux en présence sont plus difficilement soudables l'un dans l'autre. C'est ce que l'on nomme les couples de frottement basés sur la compatibilité des métaux.

Les règles technologiques président aux conceptions et prennent également en compte l'orientation des stries d'usinage qui peut favoriser l'élimination des particules, la forme des pièces, le refroidissement de la pièce supposée emmagasiner le plus la chaleur, etc. Ces règles, en générale simples et très efficaces, sont souvent méconnues.

Par exemple, pour diminuer le phénomène d'usure, il faut faire frotter des structures les plus différentes possibles, ou bien encore, croiser les traits d'usinage.