

## Chap. I : CONCEPTS GENERAUX SUR LA FATIGUE

### 1- Introduction

Les pièces ou les structures mécaniques sont soumises durant leur fonctionnement normal à des sollicitations ou charges de causes variables, dont on distingue deux types :

- **Sollicitations ou Chargements mécaniques statiques** : des contraintes stables dans ce cas les structures durent plus longtemps. Lors de la conception, le critère de dimensionnement de ces structures est fonction de la résistance ou la rigidité seulement.
- **Sollicitations ou Chargements dynamiques** : sont de causes variables (Les sollicitations ne sont pas forcément mécaniques, peuvent être thermiques, thermodynamiques, corrosives, etc...) et se traduisent par des variations cycliques de contraintes qui mène à la ruine soudaine de la structure, pourtant les sollicitations dynamiques sont modestes par rapport aux capacités statiques des matériaux définis (c à d ne dépassent pas leur résistance à la rupture et leur limite d'élasticité).

Lorsqu'un matériau ou une pièce est soumis à une charge cyclique même si elle est inférieure à la charge limite, ses propriétés mécaniques décroissent avec le temps et la structure cède. C'est le **Phénomène de Fatigue du matériau** au caractère particulièrement insidieux puisque se développant lentement dans le temps, sans modifications macroscopiques apparentes sur les pièces et structures.

Le premier vrai travail de recherche sur métal a commencé en 1842 à cause d'un accident de chemin de fer à côté de Versailles en France. Cet accident a causé 1500 à 1800 morts à l'époque. La première étude en fatigue a été réalisée sur des matériaux métalliques en 1829 par **W.A.J. Albert** qui était un ingénieur des mines allemand. Les premières études systématiques de ce phénomène, furent effectuées en 1869 par l'ingénieur des chemins de fer bavaois **A. Wöhler** qui analysait les nombreuses ruptures d'axes de wagons de chemin de fer. Il montra grâce à des essais que le nombre de cycles jusqu'à la rupture d'un arbre dépendait de la contrainte maximale dans l'axe et des détails géométriques de l'axe.

Il supposa que, comme dans un organisme vivant, la répétition de contraintes « **fatiguait** » le matériau en diminuant ses capacités de résistance. Le problème physique de la fatigue est lié à la micro géométrie de la surface du matériau et à sa structure atomique même, et donc à sa composition chimique.

Wöhler fut ainsi le premier à établir des courbes de fatigue qui aujourd'hui portent son nom.

### 2- Définitions :

La **fatigue** est une succession de mécanismes qui sous l'action de contraintes ou déformations cycliques répétées ou alternées bien quelle soient inférieures à la capacité de résistance du matériau, modifient les propriétés quasi-locales du matériau et peuvent provoquer la formation de fissures et éventuellement la rupture de la pièce.

Le mot fatigue vient d'un mot latin '**fatigare**' qui signifie '**tiredness**' en anglais. Ce terme est utilisé fréquemment en science de l'ingénierie pour montrer l'endommagement, la fissuration et la rupture des matériaux sous une sollicitation mécanique cyclique. Cette définition a été adoptée en 1964 par une Organisation Internationale de standardisation à Genève.

- si le chargement produisant la rupture est appliqué durant un petit nombre de cycles, la fatigue est qualifiée **oligocyclique**.
- si le chargement produisant la rupture est appliqué durant un grand nombre de cycles, la fatigue est dite **polycyclique**.

La fatigue polycyclique se divise en deux domaines : « **endurance limitée** » où l'on parle du régime fini de durée de vie et « **endurance illimitée** » où la structure peut supporter un nombre de cycles théoriquement infini sans qu'elle ne casse.

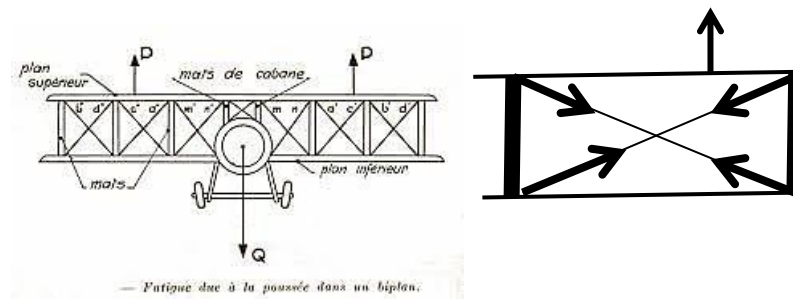
Le domaine des faibles nombres de cycles correspond habituellement pour les métaux à une plasticité non négligeable tandis que le domaine des grands nombres de cycles correspond à celui où la plasticité est habituellement nulle ou quasi-nulle.

### 3- Aspect macroscopique de la fatigue :

#### 3-1-Les sollicitations en fatigue :

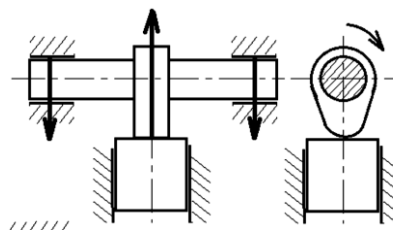
Plusieurs types de sollicitations peuvent être à l'origine du phénomène de fatigue, on distingue les suivantes :

- 1- **Sollicitations axiales (Traction/Compression)** les éléments du système triangulaire composant l'aile d'avion sont soumises à des forces de traction compression

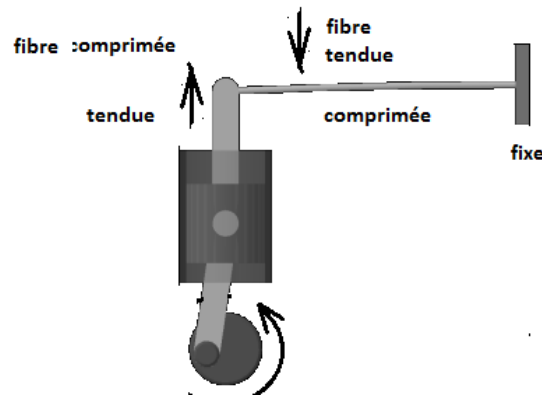


2. **Flexion** : on distingue plusieurs types de fatigue à savoir ;

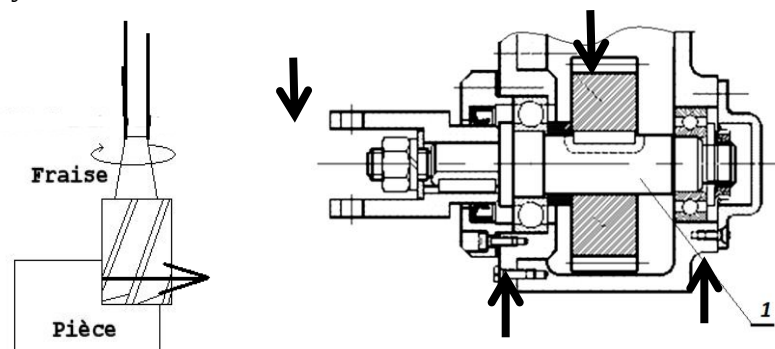
- **Flexion ondulée** : l'arbre supportant la came lorsqu'il est animé en rotation subit des ondulations à des forces d'intensité différente agissant dans le même sens.



**Flexion alternée** : Une poutre vibrant sous l'effet d'un chargement dynamique est en flexion alternée, la fibre supérieure tantôt tirée tantôt comprimée. Les contraintes sont opposées en signes durant les cycles effectués.

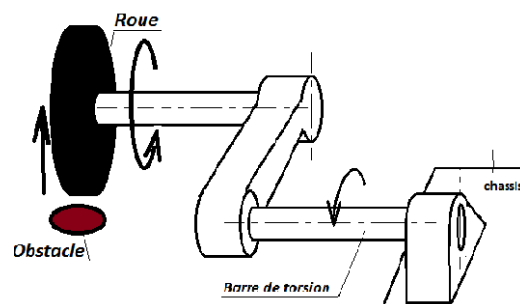


**Flexion rotative :** un arbre tournant est supporté par 2 roulements, il est assimilé à une poutre tournante par rapport à la direction de la charge, ses fibres se trouvent tantôt comprimées tantôt tendues. Le même cas pour un porte fraise. Les contraintes de flexion sont égales mais opposées durant les cycles effectués

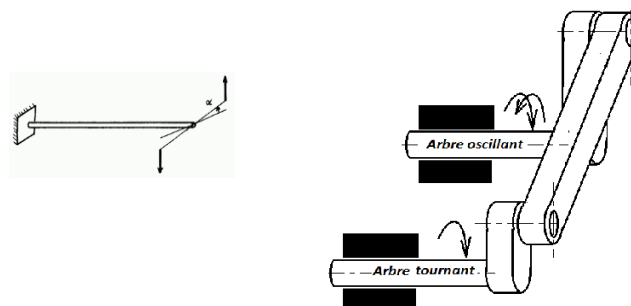


**Torsion :** Est analogue à la flexion, en effet on distingue :

**Torsion ondulée :** dans une voiture, la barre de torsion est sollicitée en torsion à chaque fois que la roue percute un obstacle l'amplitude de la torsion est variable car elle dépend de la hauteur de l'obstacle, c'est une torsion ondulée.



**Torsion alternative :** L'arbre tournant est en rotation continu et l'arbre oscillant est en rotation alternative il subit une torsion alternative



**Sollicitation combinée** : La sollicitation peut être la combinaison de traction, torsion ou de flexion.

**Fatigue en contact** : un corps en mouvement exerce une pression de contact dans un court moment sur son guide cela engendrera des contraintes de cisaillement maximales sous la surface de contact. Puisque le phénomène se répète plusieurs fois, il provoque des fissurations et entraîne la détérioration de la zone de contact par fatigue de contact.

Ce phénomène est très rencontré surtout dans les roulements, les engrenages les paliers et les rails de chemins de fer



Figure : Détérioration d'une bague de roulement par fatigue de contact.

### 3-2-Cycle de contrainte

Hypotheses : Les efforts répétés, varient en fonction du temps d'une façon périodique, dans ce cas on admet que leurs variations sont sinusoïdales, ou quelconque.

- Nous ne considérerons que des cycles tous identiques, qui sont à la base de la plupart des essais de fatigue.
- Les directions principales de ce chargement sont constantes durant l'essai de fatigue.

On considère un chargement du type de celui présenté sur la Figure suivante.

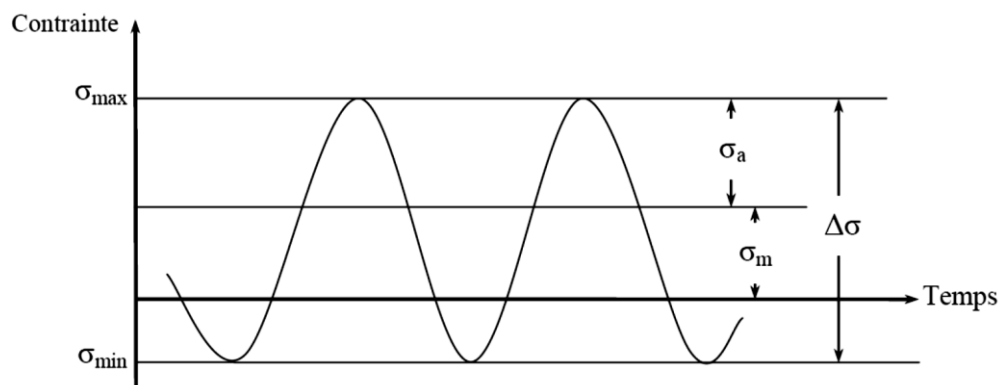


Figure : Chargement d'une éprouvette de fatigue à contrainte imposée

Les contraintes sont définies par :

**$\sigma_{\max}$  : L'amplitude maximale**, c'est la valeur maximale atteinte au cours d'un cycle

**R : Rapport de charge**, c'est le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Il constitue un paramètre caractéristique du chargement. On distingue alors les sollicitations suivantes :

- Si  $R = -1$  : contraintes alternées symétriques
- Si  $-1 < R < 0$  : contraintes alternées asymétriques
- Si  $R = 0$  : contraintes répétées ( $\sigma_m = \sigma_a$ ) ;
- Si  $R > 0$  : contraintes ondulées.

**$\sigma_a$  : Contrainte alternée:** c'est la composante alternative est la demi-amplitude du cycle

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

**$\sigma_m$  : Contrainte moyenne,** c'est la composante statique de la contrainte  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$

**$\Delta\sigma$  : Etendue de contrainte,** c'est l'intervalle de chargement maximal

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$

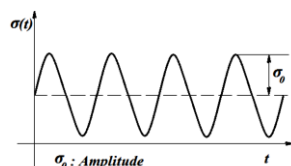
**N : La durée de vie,** est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture.

Selon des valeurs relatives des composantes  $R$ ,  $\sigma_m$  et  $\sigma_a$ , on distingue les essais sous sollicitation suivantes :

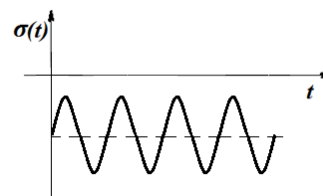
- Alternée symétrique :  $\sigma_m = 0$ ,  $R = -1$
- Alternée dissymétrique :  $0 < \sigma_m < \sigma_a$ ,  $-1 < R < 0$
- Répétée :  $\sigma_m = \sigma_a$ ,  $R = 0$
- Ondulée :  $\sigma_m > \sigma_a$ ,  $0 < R < 1$ .

Les sollicitations en fatigue peuvent être simples (comme la traction, la compression, la torsion..) ou complexes (combinées). Si on considère les signes des termes  $\sigma_{\max}$  et  $\sigma_{\min}$  et les termes  $\sigma_m$  et  $\sigma_a$  les sollicitations peuvent être classées comme suit ;

**Sollicitation répétée amplitude constante :** C'est la variation la plus simple elle est continue et à amplitude de contrainte constante. (Fig.)



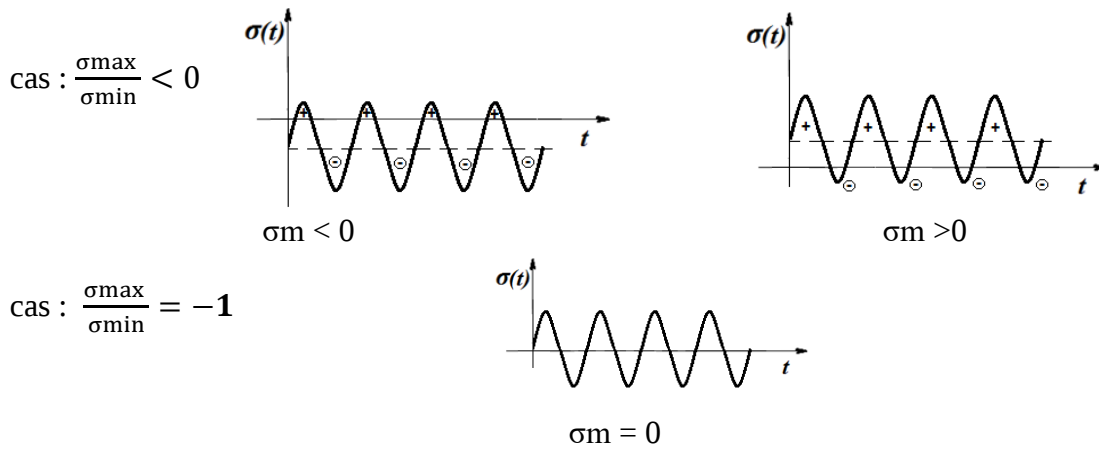
$$\sigma_m > 0$$



$$\sigma_m < 0$$

Figure : Contrainte sinusoïdale à amplitude constante.

**Sollicitation alternée :** plusieurs cas sont à retenir



**Sollicitation statique :**

cas :  $\sigma_a = 0$  et  $\sigma_m \neq 0$



**Coefficient de Steefhelner :  $\Phi$**  est utilisé pour caractériser le type de sollicitation :

$$\Phi = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad \text{ou} \quad -1 \leq \Phi \leq +1$$

Si  $\Phi = -1$  ; Contrainte complètement renversée

Si  $\Phi = 1$  ; Sollicitation statique

Si  $-1 < \Phi < 0$  ou  $0 < \Phi < +1$  ; Sollicitation répétée

**Sollicitations sinusoïdale à amplitude variable :**

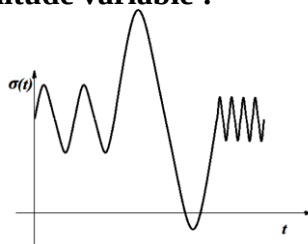


Figure : Contrainte sinusoïdale à amplitude variable.

**- Sollicitation aléatoire :**

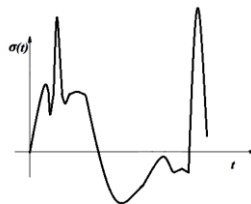


Figure : Contrainte aléatoire.

#### 4 –Les Essais d'endurance :

La résistance en fatigue ou la limite d'endurance est l'une des caractéristiques requises pour le dimensionnement des structures. On classe les essais en deux catégories :

**Essais simples :** (basés sur des sollicitations simples et des éprouvettes normalisées)

**Essais spéciaux :** (Les échantillons peuvent être de différentes formes soumises à des sollicitations complexes).

On considère uniquement les essais simples suivants :

- 1) Essai de traction
- 2) Essai de Wöhler (Flexion en encastrement)
- 3) Essai de Moore (flexion 4 points)
- 4) Essai de torsion alternée.

**1- Essai de fatigue en traction :** L'éprouvette est maintenue fixe à un côté et tirée/comprimée à l'autre côté . La contrainte appliquée est complètement renversée ( $\sigma_m = 0$ )

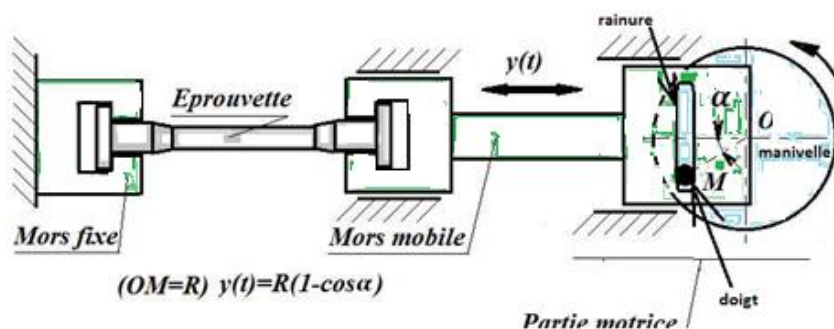


Figure : Schéma de principe de la machine d'essai de fatigue en traction.

**2- Essai de Wöhler :** L'éprouvette supportée à un bout par une mâchoire tournante et entraînée en rotation à l'autre bout elle est soumise à un effort radial donc c'est un essai de flexion rotative.

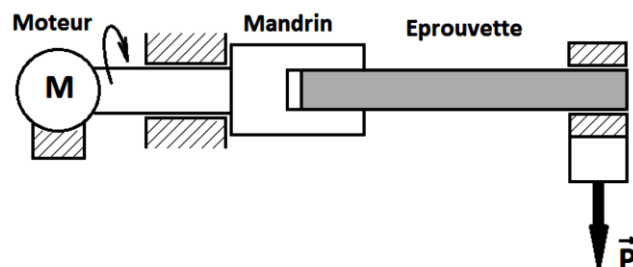


Figure : Principe de l'essai de Wöhler

**3- Essai de torsion :** L'éprouvette est fixée à un côté et l'autre côté est soumis à une rotation alternative imposée par un mécanisme de bielle manivelle.

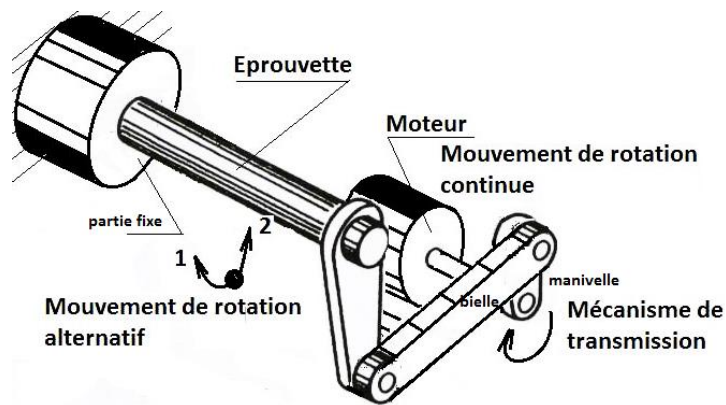


Figure : Principe de l'essai de torsion alternée.

- 4- **Essai de Moore** : Dans cet essai l'éprouvette est soumise à une flexion rotative (4 points) mais l'avantage essentiel c'est la simplicité de la machine. L'éprouvette est en rotation continue mais soumise à des poids  $P$  qu'on peut faire varier.

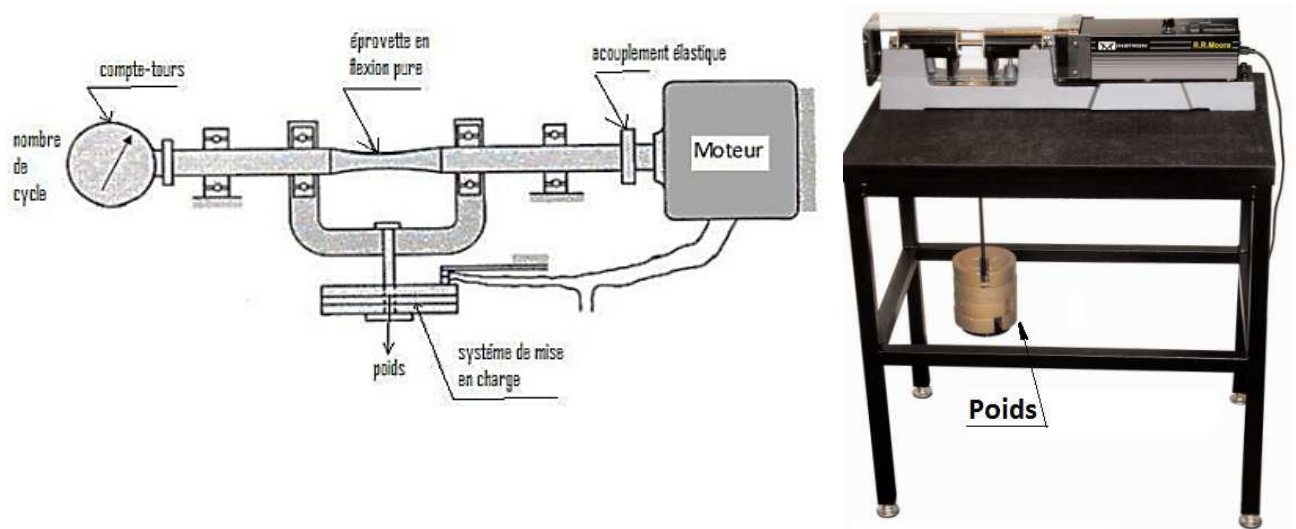


Figure : Schéma de principe de la machine d'essai de Moore.

### 3- Mécanismes de la fatigue :

Comprend trois périodes d'importances variables suivant les matériaux et les caractéristiques des sollicitations figure:

- période d'amorçage,
- période de propagation,
- rupture brutale.

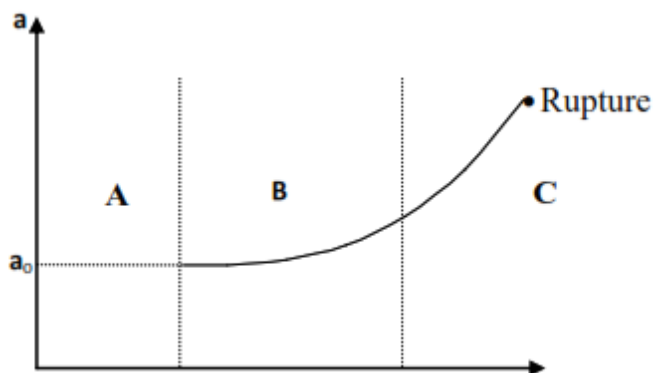


Figure. Représentation schématique de la propagation d'une fissure.

**Période d'amorçage:** (phase A) marquée par l'initiation de microfissures de très grande finesse et difficilement détectable, ne peuvent être mises en évidence que par de puissants moyens de laboratoire. Cette phase d'endommagement peut devenir irréversible. L'initiation des fissures a presque toujours lieu en surface dans les matériaux métalliques ou éventuellement à une discontinuité proche de la surface (précipité, oxyde, interface entre deux couches de duretés différentes...), qui conduit localement à une forte concentration des contraintes.

Il faut noter que le chargement mécanique ne déclenche pas la ruine immédiate de l'éprouvette mais certains grains vont se déformer de manière intense, soit parce qu'ils sont très bien orientés pour glisser et relativement peu confinés car proches de la surface, soit du fait d'une irrégularité géométrique (rayure), soit d'une manière assistée par la corrosion.

Jusqu'à un certain seuil d'endommagement, il est possible, par de judicieux traitements mécaniques et (ou) thermiques, de faire disparaître l'effet et donc de revenir à un état initial non endommagé.

**Période de propagation :** (phase B), lorsque la pièce a subi un endommagement irréversible et commence d'entrer dans la période de propagation des fissures. Cette période peut être scindée en deux phases distinctes:

**Stade 1 :** stade de propagation interne des microfissures précitées: Les microfissures suivent les bandes de glissement dans lesquelles elles sont nées en restant approximativement parallèles au plan de la scission maximale. Leur vitesse de propagation est alors très faible (de l'ordre de **nm/cycle**) sont souvent arrêtées par les joints de grains qu'elles ne peuvent pas franchir facilement si le grain adjacent n'est pas favorablement orienté.

**stade II :** stade de propagation d'une des microfissures : Le champ des contraintes évoluant lorsqu'on pénètre à l'intérieur de la pièce, une des microfissures va quitter le plan de la scission maximale pour suivre le plan orthogonal à la plus grande contrainte principale maximale (positive), et va stopper la propagation de ses congénères (par effet de décharge) et devient alors la fissure de fatigue qui conduira à la ruine de la pièce, La vitesse de propagation, d'abord très faible (quelques  $\text{\AA}/\text{cycle}$ , c'est-à-dire quelques  $10^{-1} \text{ }\mu\text{m}/\text{cycle}$ ) va s'accélérer progressivement jusqu'à atteindre quelques  $\mu\text{m}$  par cycle). C'est durant cette période que des contrôles de la pièce permettent de détecter la fissure qui va conduire à la ruine et d'agir en conséquence (remplacement, réparation, surveillance).

**Rupture brutale :** Lorsque la fissure intéresse une section de la pièce telle que la section résiduelle qui est trop faible pour supporter les sollicitations appliquées, il se produit la rupture brutale catastrophique.

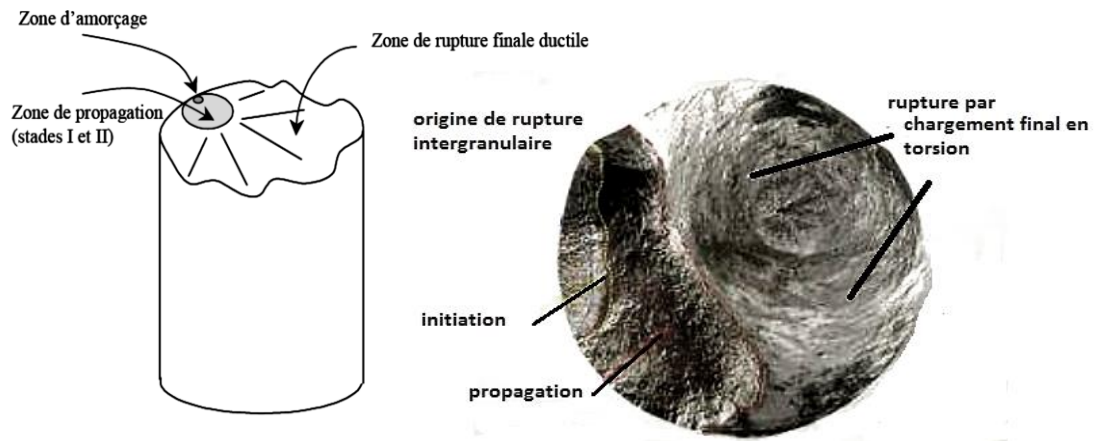


Figure. Faciès de rupture d'un arbre de transmission rompu par fatigue.

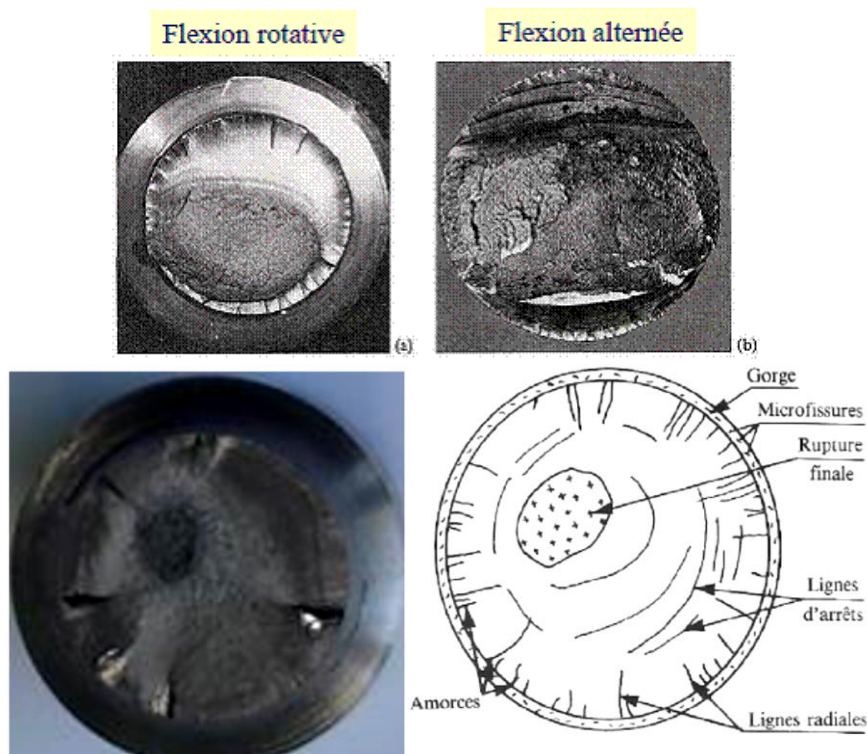
#### 4- Changement microstructuraux

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Elle permet de montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé

#### Faciès de fatigue à l'examen optique :

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil et à la loupe un nombre de caractéristiques (figure) Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :

- 1- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.
- 2- La fissure de surface avec une surface lisse.



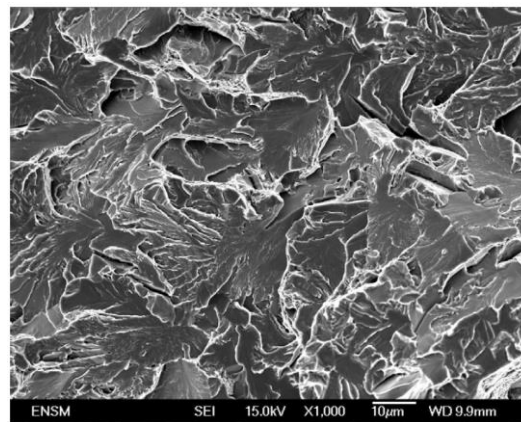
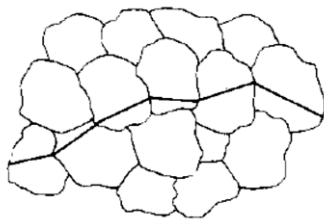
- L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (Tableau).

### Faciès de fatigue à l'examen microscopique :

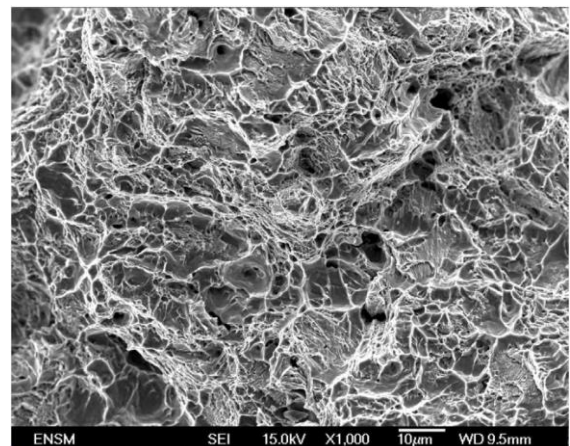
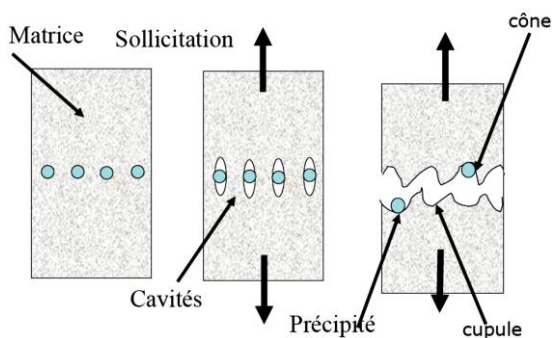
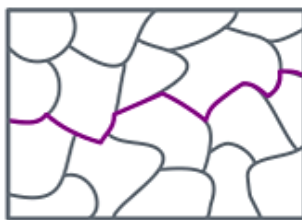
Le microscope électronique à balayage (MEB) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

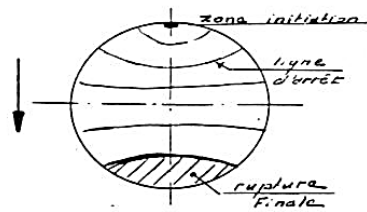
#### - Rupture Brutale (finale) :

**a- Fragile** : par clivages trans-granulaires lisses avec réamorçages par rivières lors des passages des joints de grains ou des clivages à languettes suivant des plans cristallographiques proches à forte densité, le sens de propagation de la rupture est indiqué par le sens des rivières. (brillance)

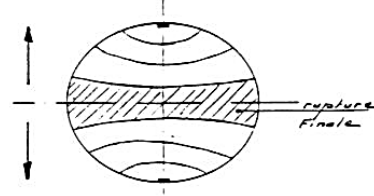


**b- Ductile** : par cupules (creux amorcés sur des précipitations) les deux faces de la rupture présentant ces cupules qui se produisent après une déformation plastique importante, lorsque les cupules ne sont pas équiaxes (ce qui généralement le cas sauf en traction pure), le sens de propagation est donné par le grand axe des cupules.

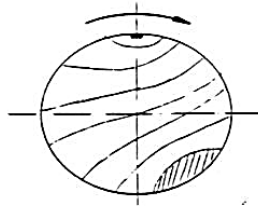




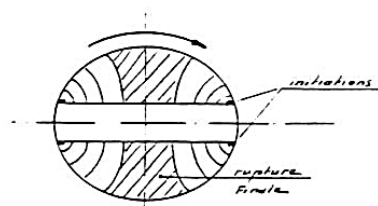
a) Rupture en flexion ondulée. La rupture finale est reportée à l'opposé de la zone d'initiation.



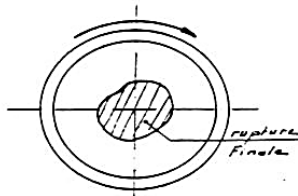
b) Rupture en flexion purement alternée. La rupture finale occupe une position médiane.



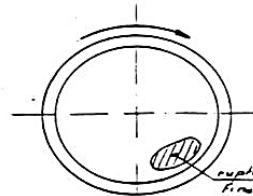
c) Rupture en flexion rotative sur arbre lisse



d) Rupture en flexion rotative sur arbre percé diamétralement



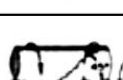
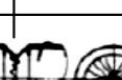
e) Rupture en flexion rotative : sollicitations élevées



f) Rupture en flexion rotative : sollicitations faibles

Figure : Etude expérimentale sur la Fatigue des Matériaux en Flexion Rotative

Tableau : Faciès de fatigue

| Type de sollicitation                                   | Contrainte nom. élevée                                                              |                                                                                     |                                                                                     | Contrainte nom. Faible                                                               |                                                                                       |                                                                                       |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                         | Concentration de contrainte                                                         |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|                                                         | Nulle                                                                               | Faible                                                                              | élevée                                                                              | Nulle                                                                                | Faible                                                                                | élevée                                                                                |
| Traction-traction<br><br>Ou<br><br>Traction-compression |    |    |    |    |    |    |
|                                                         |    |    |    |    |    |    |
|                                                         |    |    |    |    |    |    |
|                                                         |    |    |    |    |    |    |
| Flexion plane<br><br>Ondulée                            |    |    |    |    |    |    |
|                                                         |   |   |   |   |   |   |
|                                                         |  |  |  |  |  |  |
| Flexion plane<br><br>Alternée                           |  |  |  |  |  |  |
|                                                         |  |  |  |  |  |  |
|                                                         |  |  |  |  |  |  |
| Flexion rotative                                        |  |  |  |  |  |  |
| Torsion                                                 |  |  |  |  |  |  |

### 6-1- Stades de fissuration :

La rupture par fatigue est le phénomène de propagation d'une fissure sous chargement variable passant par les 2 stades (amorçage, propagation stable).

Si nous considérons une structure contenant une fissure de longueur ( $a$ ), et on suit le comportement de cette fissure (la longueur en fonction du nombre de cycles appliqués  $N$ ) pendant un essai de fissuration, sous un chargement cyclique à amplitude constante, on constate que cette croissance continue jusqu'à la rupture.

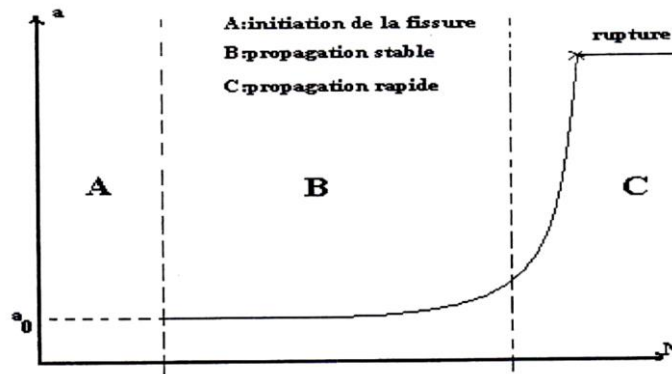


Figure : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de Cycles.

En générale l'amorçage des fissures résulte de la concentration de déformation plastique qui se produit dans un domaine de dimension finie. Une fois que les fissures se sont amorcées ; elles peuvent se propager sous l'action de sollicitations. Trois domaines de fissuration sont identifiés voir courbe :

**Domaine I :** C'est le domaine des faibles vitesses de fissuration, ou un seuil de non fissuration  $\Delta K_s$ , dont l'existence est marquée selon les matériaux, c'est un seuil en dessous duquel une fissure préexistante ne peut se propager.

**Domaine II :** Dans ce domaine on obtient une relation linéaire entre  $(da/dN)$  et  $\Delta K$  pour plusieurs métaux. De nombreuses relations empiriques permettant de relier la vitesse de propagation au facteur d'intensité de contrainte ont été établies, telle que la loi de Paris, s'écrit sous la forme :  $da/dN = C \Delta K^m$

**Domaine III :** Ce domaine caractérise par une accélération de la vitesse de propagation de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte qui se termine par la rupture brutale lorsque le niveau de sollicitation approche la condition de la rupture, caractérisé par  $K_{max} = K_{IC}$ . ( $K_{IC}$  est le facteur d'intensité de contrainte critique à la rupture).

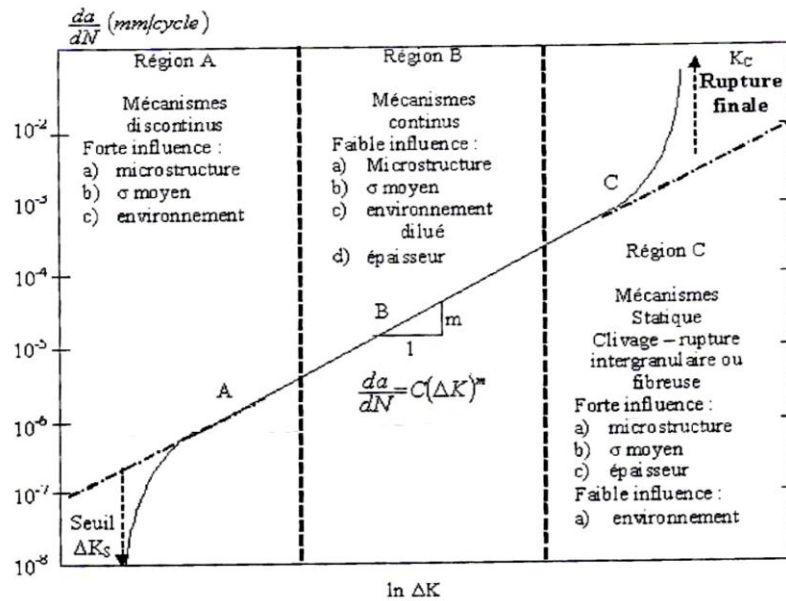


Figure : Représentation schématique des différents régimes de propagation.

## 5- Différentes approches de la fatigue:

Il existe 2 approches de la fatigue ;

- Approches en durée de vie :
- approches Approche en tolérance aux dommages.

### 7-1- Approche de la durée de vie (Courbe de Wöhler) :

(Courbe «S.N» dans les pays anglo-saxon (Sterss-Number of cycles)). Cette courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques  $S$  en fonction du nombre de cycles à rupture  $N_R$  (reporté sur échelle logarithmique). Ces courbes obtenues par des essais à fréquence élevée (typiquement 20Hz) sur des machines de flexion. On distingue les essais menés à charge imposée et les essais menés à déformation totale imposée. Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines :

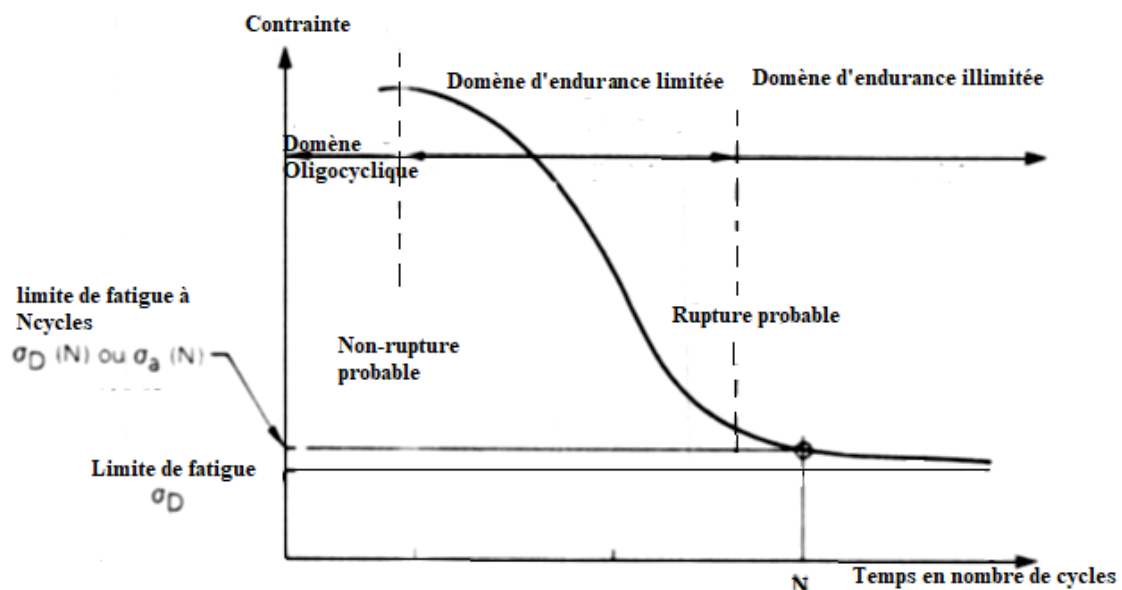


Figure: Vue schématique d'une courbe S-N (courbe de Wöhler).

**Domaine de la fatigue oligocyclique :** les ruptures surviennent après un petit nombre de cycle  $N \leq 10^5$  cycles.

**Domaine d'endurance limitée :** ( $N > 10^5$  cycles) les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissants avec la décroissance des contraintes.

**Domaine d'endurance illimitée :** où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

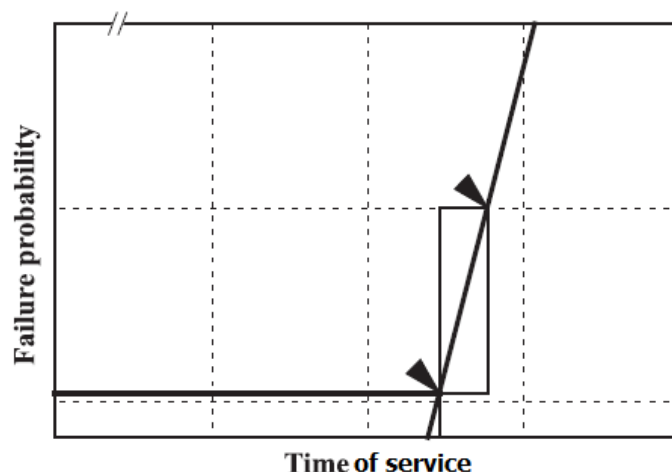
Entre les deux derniers domaines la courbe de Wöhler présente **un coude** plus ou moins prononcé compris entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles.

**Limite de fatigue :** L'asymptote horizontale. Tout chargement situé **au-dessous** de cette asymptote conduit à une durée de vie en fatigue « **infinie** ». C'est le cas de certains aciers et alliages de titane, à la température ambiante. Par contre on définit en revanche une limite d'endurance pour un nombre de cycles élevé (typiquement  $10^7$  à  $10^8$ ). C'est le cas de nombreux alliages non ferreux, par exemple les alliages d'aluminium.

La limite de fatigue ou d'endurance peut être nettement inférieure à la résistance à la traction, elle vaut environ 50% de celle-ci pour les aciers, 35% pour les alliages de nickel, cuivre ou magnésium (limite à  $10^8$  cycles) pour R = 0 à la température ambiante.

## 7-2- Approche de tolérance aux dommages:

La Première approche de la résistance à la fatigue depuis les années 1950, a conduit à la notion de «Durabilité» d'une structure: détermination d'une vie sûre. Dès 1960, en travaillant à la prévention de l'échec soudain d'une structure, notamment en raison de dommages d'un élément de service essentiel, de l'industrie l'aéronautique a introduit une notion de «non-échec».



Avec l'introduction du concept de tolérance aux dommages, la structure est définie et dimensionnée en considérant la persistance de dommages qui peuvent être détectés, hypothétique ou réel, isolé ou simultané, et de toute nature (fabrication défaut, initiation de

fissures de fatigue, dégâts accidentels, etc.). La notion de sécurité exige que des dommages potentiels soient détectés avant d'atteindre un danger dimension par:

- Progression des dégâts (propagation des fissures) assez lente pour rester en sécurité pendant toute la durée d'utilisation (structure de croissance de la fissure lente)
- Présence de certains éléments qui peuvent arrêter la propagation du potentiel dommage (s) (structure d'arrêt de fissure).

La propriété de "résistance aux dommages" de la structure est estimée à partir de trois principaux paramètres:

- la taille critique des dégâts concernant la charge à l'arrêt;
- la taille minimale détectable des dégâts;
- la période de détection et les actions de maintenance connexes assurant la sécurité des systèmes opérateurs

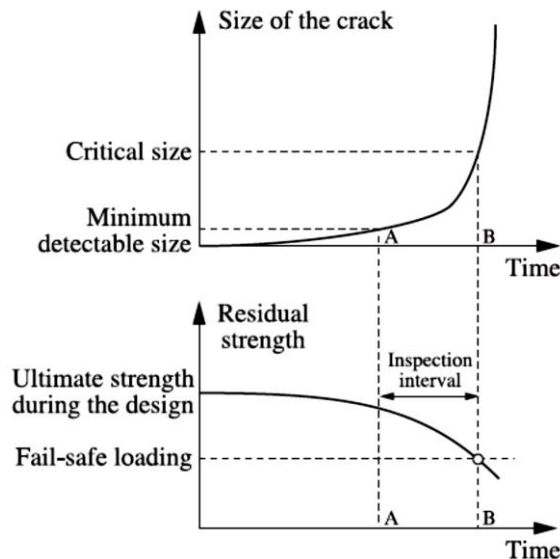


Figure. Tolérance de dégâts: sécurité et inspection