

2.4 Fatigue des matériaux

Considérons une lame de ressort à lames d'une voiture. Cette lame est toujours soumise à des efforts (charges), des températures et des déformations variables. Ces contraintes affectent les caractéristiques ou les propriétés (mécaniques ou autres) de notre lame au cours du temps. Ce qui cause la dégradation de ces propriétés. On dit que cette lame est « fatiguée ». Cette dégradation peut causer ainsi l'endommagement ou la destruction de notre lame. On peut donner aussi l'exemple du cartilage du genou de l'homme. Comme le genou est soumis à la charge de la partie supérieure du corps et aux différents mouvements, ce cartilage va perdre ces propriétés causant ainsi douleurs pour le patient.

2.4.1 Définitions

La fatigue est l'endommagement d'une pièce sous l'effet de différents efforts : sollicitations appliquées, vibrations, rafales de vent... Alors que la pièce est en principe fabriquée pour résister à des efforts donnés, l'application et le retrait d'efforts plus faibles peut provoquer sa rupture.

Considérons un arbre de diamètre D (mm) peut tenir un objet d'une tonne, mais il ne peut pas le tenir si son diamètre était très inférieur à D et il peut se casser.

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui, sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps, dégrade les propriétés locales d'un matériau. Cette action peut entraîner la formation de fissures et finit par la rupture de la structure.

La fatigue se caractérise surtout par une étendue de variation de contrainte qui peut être bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau.

L'endommagement par fatigue d'un corps débute par l'amorçage de fissures (s'il n'y a pas de défauts dans le matériau), puis s'ensuit par la propagation de fissures et finit par la rupture.

La prédiction du comportement en fatigue et le nombre de cycles à la rupture d'un assemblage utilise souvent l'amplitude de la charge (chargement ou déformation imposée), sa valeur moyenne, l'état de surface et le milieu dans lequel il travaille. La figure 2-23 présente des Photomicrographie de la progression des fissures dans un matériau dues à la fatigue



Figure 2-23: Photomicrographie de la progression des fissures dans un matériau dues à la fatigue. Image tirée de (Ewing et Humfrey 1903).

Donc, sous l'action de charges répétées ou alternées, la rupture d'un matériau peut se produire sous des contraintes inférieures à la résistance du matériau en statique : c'est la rupture en fatigue. Cette rupture vient principalement de fissures microscopiques qui apparaissent dans le matériau dès les premiers cycles de chargement et qui progressent doucement à chaque fois que l'on sollicite le matériau. Il existe de nombreuses courbes pour définir la durée de vie en fatigue d'un matériau. Ces courbes sont issues de campagnes d'essais et reflètent le comportement statistique du matériau, elles sont souvent tracées à 95% de probabilité de résistance.

2.4.2 Mécanisme de la fatigue d'une pièce métallique

Si on exerce une contrainte sur une éprouvette lisse (avec un champ de contrainte quasi uniforme) métallique ductile, au-delà la limite d'élasticité (R_e), l'éprouvette commence à se déformer de manière irréversible par déformation plastique. Lorsqu'on continue à exercer une contrainte supérieure à la limite d'élasticité (R_e) sur l'éprouvette, cette déformation plastique entraîne un endommagement suivi par une rupture. La contrainte provoquant cette rupture n'est que la résistance à la traction R_m ($R_m > R_e$).

Si on fabrique une pièce, on doit la dimensionner pour que la contrainte ne dépasse jamais la limite d'élasticité (R_e), ce qui provoquerait une déformation irréversible de la pièce et par suite

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

la perturbation du fonctionnement du système. C'est-à-dire, il faut que la contrainte ne dépasse jamais la résistance à la traction R_m .

Or, dans le cas d'un chargement cyclique, on observe une rupture après plusieurs cycles (voire des millions de cycles), pour des valeurs de contrainte inférieures à la limite d'élasticité (R_e).

Certains matériaux présentent *une limite d'endurance*, inférieure à la limite d'élasticité (R_e). Si la contrainte est inférieure à cette limite d'endurance, on n'observe jamais de rupture (du moins pas dans un temps raisonnable, typiquement plus de 10^8 de cycles). Certains matériaux n'ont pas de limite d'endurance, et la rupture survient toujours au bout d'un nombre plus ou moins long de cycles même pour de faibles valeurs de contrainte (cas des alliages d'aluminium).

Lors de la conception d'une pièce, on doit examiner ses différents modes de dégradation :

- La rupture statique ou rupture en moins d'un cycle (dans la phase ascendante de la charge, soit dans le premier quart du cycle dans le cas d'un cycle de type sinusoïdal).
- La déformation permanente (déformation plastique) si elle obéit le fonctionnement ultérieur.

Et si la structure subit des contraintes répétées :

- La rupture en fatigue Oligocyclique, pour des chargements conduisant à la destruction en moins de 5×10^4 cycles.
- La fatigue conventionnelle au-delà de 5×10^4 cycles.

Ces différents modes de rupture correspondent à des chargements d'amplitudes décroissantes.

La rupture en fatigue se produit en priorité dans les zones où les contraintes alternées sont les plus fortes, ou aussi, dans les zones à *concentration de contraintes* (trous, entailles...).

En observant la surface rompue au microscope, on a un faciès typique : des stries globalement parallèles, correspondant à la propagation de la fissure à chaque sollicitation, puis une zone d'arrachement, correspondant à la rupture finale (Figure 2-24).



Figure 2-24: Faciès de rupture de fatigue (manivelle de pédalier de vélo) : On distingue les lignes de progression de fissures en bas à droite (zone sombre), et la zone d'arrachement (zone claire)

2.4.3 Aspects macroscopiques de la fatigue

L'ensemble des sollicitations cycliques subie par une pièce est en générale très complexe : un grand nombre de sollicitations se superposent, comme les cycles de pressurisation et dépressurisation, les vibrations, les passages dans des conditions météorologiques difficiles pour les fuselages aéronautiques. Il y a des méthodes normalisées de comptage des cycles pour simplifier ces histoires mécaniques (les spectres) et utiliser les résultats d'essais de laboratoire, plus simples, pour le dimensionnement des pièces en service. Les cycles sont tous identiques, de forme triangulaire ou sinusoïdale, qui sont à la base de la plupart des essais de fatigue.

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

Pour simplifier le travail, on considère que le type et les directions de chargement (traction, flexion, torsion, etc.) sont constants durant l'essai de fatigue. On fait donc un chargement du type de celui présenté sur la Figure 2-25.

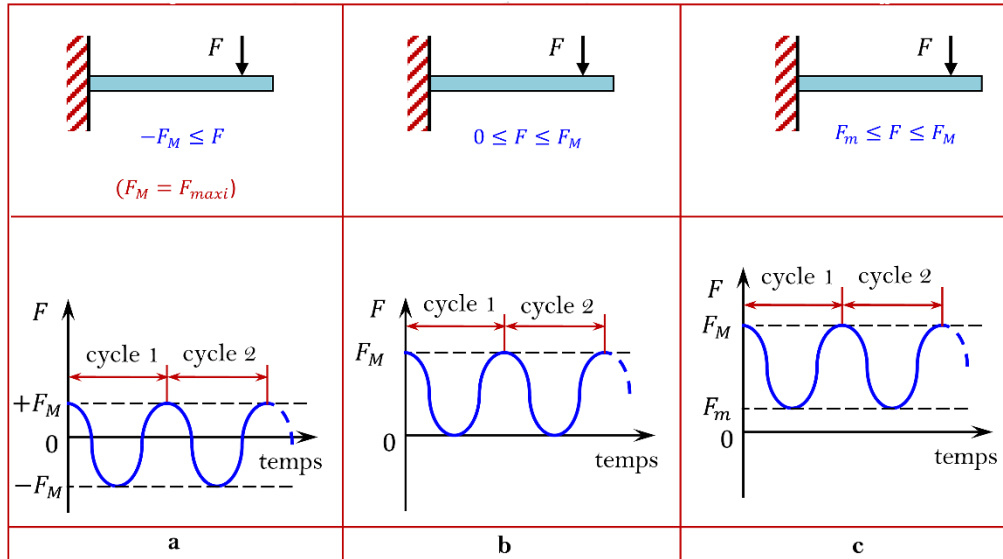


Figure 2-25: (a) : Charge alternée, (b) : Charge alternée dans un seul sens, (c) : Charge ondulée.

On note σ_{\min} la contrainte minimale et σ_{\max} la contrainte maximale du cycle. La contrainte alternée σ_a , et la contrainte moyenne σ_m , ainsi que le rapport de charge R , définis par :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \text{Eq 2-26}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \text{Eq 2-27}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad \text{Eq 2-28}$$

2.4.4 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler est appelée courbe S-N (Stress - Number of cycles) dans les pays anglo-saxons. Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée σ (parfois notée S) et le nombre de cycles à la rupture N_R (en fait nombre de cycles pour lequel on observe la probabilité de ruptures P%). En pratique, la courbe de Wöhler est généralement donnée pour une probabilité de rupture $P = 0.5$.

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et à noter le nombre de cycles au bout duquel l'amorçage d'une fissure est observé, appelé ici nombre de cycles à rupture N_R . Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte σ_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire. Ainsi, à chaque pièce essayée, correspond donc un point du plan (N_R, σ_a) et à partir d'un certain nombre d'essais à contrainte généralement décroissante, on peut établir la courbe de Wöhler (Figure 2-26) qui a l'allure suivante :

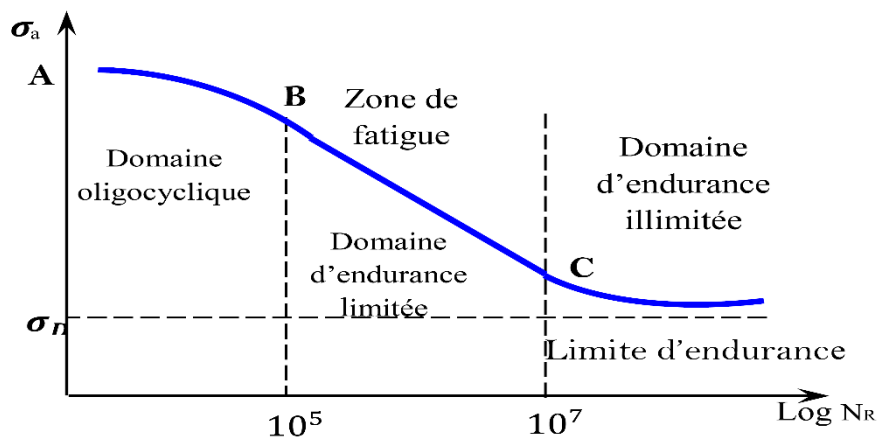


Figure 2-26: Principales zones de la courbe de Wöhler

- **La zone AB, dite domaine oligocyclique**, qui correspond aux contraintes les plus grandes, supérieures à la limite d'élasticité macroscopique et où le nombre de cycles à la rupture s'étend de 0.5 jusqu'à 10^4 ou 10^5 (pour les aciers doux). Dans cette zone, la rupture survient après un petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable. Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique.
- **La zone BC, dite zone de fatigue ou d'endurance limitée**, où la rupture est atteinte après un nombre de cycles compris approximativement entre 10^4 et 10^6 à 10^7 . La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique. L'adaptation élastique est un état où la réponse de l'éprouvette devient purement élastique, il peut y avoir de la déformation plastique durant les premiers cycles, mais au bout d'un certain nombre de cycles, elle reste constante ; l'état final cependant dépend de l'état initial de la structure. C'est le domaine dans lequel travaillent la plupart des structures qui pour

diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits (cas des structures aéronautiques ou automobiles ou nucléaires).

➤ **La zone CD, dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité**, où D est un point pour les métaux ferreux qui est à l'infini. La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de 10^6 à 10^7 cycles, suivie d'une zone (CD) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe de nombre de cycles (N). En delà de cette valeur limite de σ , notée σ_D , il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué. σ_D est nommée **limite de fatigue ou limite d'endurance**. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux). Les grandes durées de vie concernent le domaine de la fatigue polycyclique.

2.5 Fluage des matériaux

A haute température, de nouveaux mécanismes de déformation peuvent être mis en jeu. De nouveaux systèmes de glissement sont finalement activés. Les processus contrôlés par la diffusion sont accélérés et ont un effet significatif sur les propriétés mécaniques. Ainsi, la mobilité des dislocations est accentuée par le mécanisme de montée. Le glissement aux joints de grains peut aussi participer à la déformation.

Les mécanismes mis en jeu à haute température dépendent largement du temps, on s'intéresse aux performances mécaniques à haute température, sous sollicitation constante sur des durées importantes. Dans de telles conditions, la déformation progressive du matériau est appelée **fluage**.

2.5.1 Définition :

Le **fluage** est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible d'un matériau soumis à une contrainte constante (notée σ_0), inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante. Le fluage ainsi que la relaxation de contrainte sont deux méthodes en quasi-statique de caractérisation des matériaux ductiles mais aussi fragiles (cas du béton).