

Quelques rappels sur le dommage par fatigue

Introduction

Il est simplement à noter que la fatigue commence par une déformation plastique tout d'abord localisée autour de certains défauts macroscopiques (inclusions, fissures de fabrication ...) sous des contraintes globales qui peuvent être inférieures à la limite élastique du matériau. Pour un seul cycle l'effet est tellement faible qu'il est négligeable. Si la sollicitation est répétée, chaque cycle crée une nouvelle plasticité localisée. Après un nombre de cycles variables suivant le niveau de la contrainte appliquée, des fissures ultra microscopiques peuvent se former dans la région devenue plastique. La déformation plastique s'étend ensuite depuis les extrémités des fissures qui s'agrandissent jusqu'à devenir visibles à l'œil nu et conduisent à la rupture de la pièce. Le dommage par fatigue est un phénomène cumulatif. La boucle d'hystérésis obtenue pour un cycle contrainte-déformation tracé est ainsi une courbe non fermée dont la forme évolue en fonction du nombre de cycles appliqués. Chaque cycle de contrainte produit un certain dommage et la succession des cycles se traduit par un effet cumulatif. (Figure 1).

L'endommagement est en général localisé au droit d'une discontinuité géométrique ou d'un défaut. Le dommage par fatigue est lié à des phénomènes multiples et en particulier mécaniques avec apparition et croissance de fissures dépendant de l'évolution microstructurale et de paramètres mécaniques avec éventuellement des effets de l'environnement notamment.

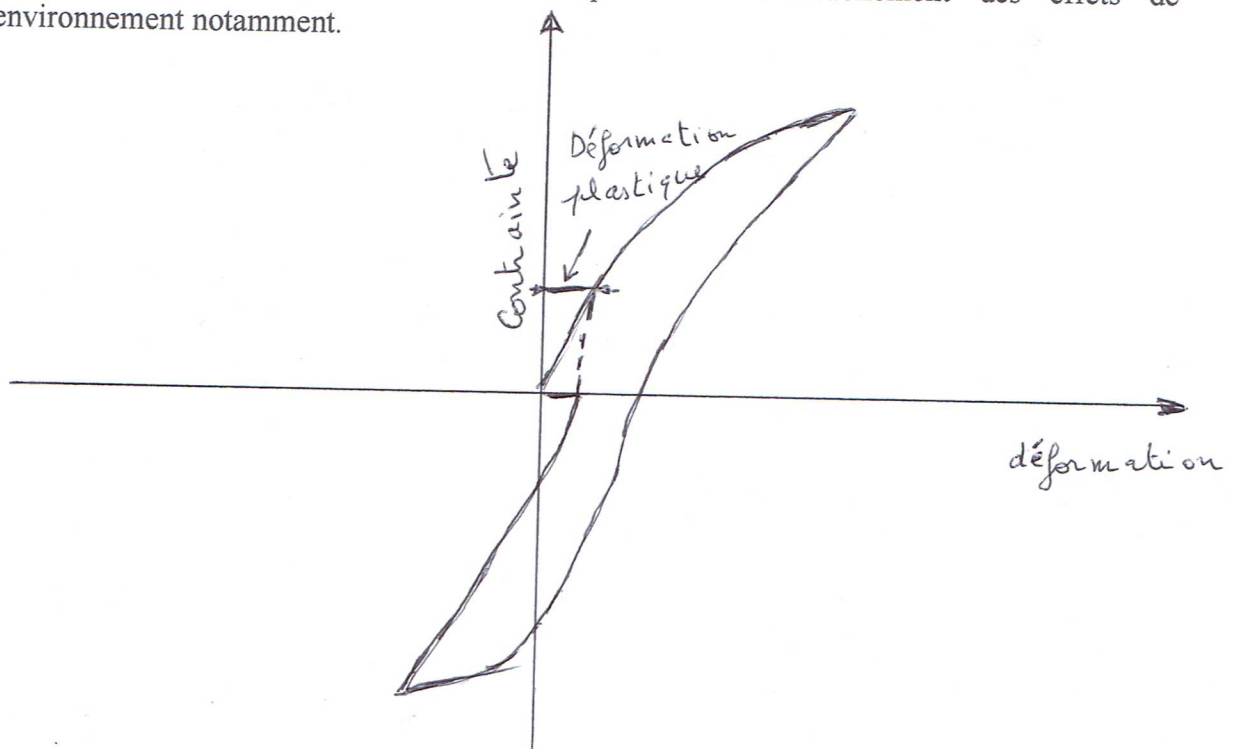


Figure 1 : Boucle d'hystérésis non fermée

Pour se protéger contre les ruptures par fatigue de pièces dimensionnées en statique et soumises à des charges variables, on a été amené tout d'abord à adopter des coefficients de sécurité arbitraires, mal choisis, insuffisants ou trop grands conduisant à des dimensions et des masses excessives. Une conception raisonnable recommanderait de faire travailler les matériaux dans le domaine élastique. Cependant, il existe toujours des déformations plastiques en des points de forte concentration de contrainte. Les contraintes et les déformations nominales sont élastiques et linéairement reliées entre elles et aux charges appliquées. Ce n'est pas le cas des contraintes et des déformations locales qui existent dans certains matériaux métalliques et granulaires aux points critiques et qui contrôlent la tenue en fatigue de la structure entière. Il est apparu nécessaire d'effectuer des essais et des expérimentations sur des éprouvettes ou des échantillons pour mieux comprendre la tenue en fatigue sous des charges cycliques (en commençant par exemple par la plus simple qui est la charge sinusoïdale).

Caractérisation de l'endurance des matériaux : courbe de Wöhler

L'endurance des matériaux est étudiée en Laboratoire en soumettant jusqu'à la rupture des éprouvettes taillées dans le matériau à des contraintes d'amplitude σ (ou à des déformations généralement sinusoïdale). C'est Wöhler le premier qui a effectué des travaux sur les axes de wagons de chemin de fer soumis à des contraintes de flexion rotative (vers 1860 ; 1870). Pour chaque éprouvette il note en fonction de niveau de contrainte appliquée σ , le nombre N de cycles à la rupture ou durée de vie. La courbe obtenue en traçant σ en fonction de N est appelée courbe de Wöhler ou courbe $S - N$ (*Stress - Number of cycles*) ou courbe d'endurance. L'endurance se définit comme l'aptitude d'une pièce ou d'une structure à résister à la fatigue. Compte tenu des grandes variations de N en fonction de σ , il est d'usage de porter en général en abscisse $\log N$ (logarithme décimal) (Figure 2).

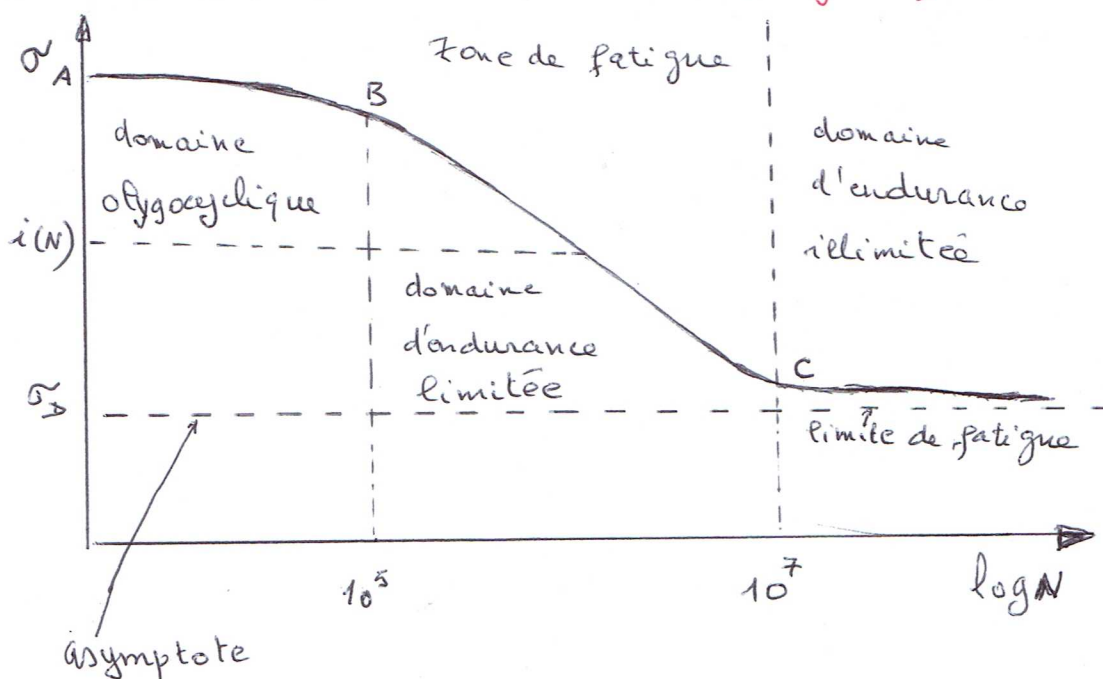


Figure 2 : Exemple de tracé de courbe de Wöhler et ses principales zones

En pratique il n'est pas raisonnable de vouloir caractériser la tenue en fatigue d'un matériau par une courbe de Wohler tracée en effectuant un seul essai ou une seule expérimentation à chaque niveau de contrainte. Il est plus correct et plus raisonnable de décrire cette courbe par une courbe à caractère statistique (plusieurs éprouvettes par exemple 3 pour chaque niveau de contrainte choisi et défini). L'axe des abscisses donnant la durée de vie N pour une probabilité de survie P_s ou une probabilité de rupture P_r . On parle en général de courbe de longévité ou de courbe d'équiprobabilité. La courbe de Wöhler est en général tracée dans des axes semi-logarithmiques $\log N - \sigma$, dans lesquels elle présente une partie approximativement linéaire variable suivant le matériau (BC) suivie d'une asymptote à la droite $\sigma = \sigma_D$ (Figure 3). Diverses expressions et formulations ont été proposées depuis le siècle dernier pour décrire la courbe de Wöhler représentative de la résistance à la fatigue d'un matériau, souvent dans la zone d'endurance limitée. La définition de cette courbe a d'ailleurs évolué au fil des ans pour passer d'une courbe déterministe à une courbe à caractère statistique.

Fatigue des matériaux composites

Une différence essentielle entre les matériaux métalliques et les matériaux composites réside dans leur comportement respectif en fatigue. Les matériaux métalliques cassent usuellement par initiation et propagation de fissure d'une manière qui peut être prédite par les concepts de la mécanique de la rupture. Les composites présentent plusieurs modes de dégradation tels que le délaminage, la rupture des fibres, le déchaussement des fibres, l'apparition de vides, la rupture de la matrice, la rupture du composite. Une structure peut présenter l'un ou plusieurs de ces modes et il est difficile à priori de savoir celui qui va prédominer et produira la rupture.

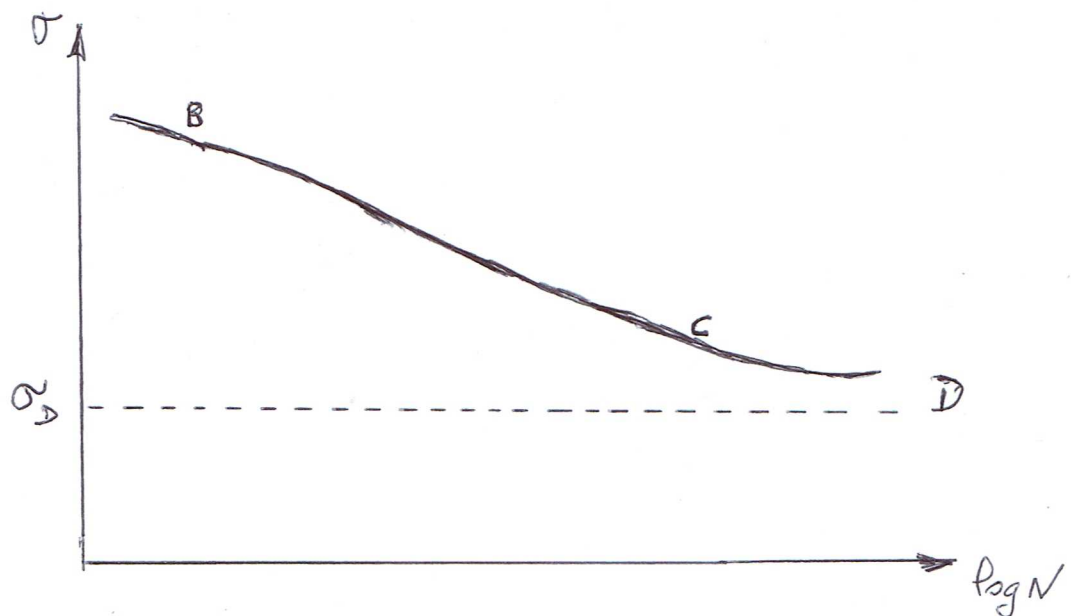


Figure 3: Représentation de la courbe de Wöhler dans des axes semi-logarithmiques

Evolution et cumul du dommage par fatigue

D'un point de vue fondamental, le concept de dommage par fatigue n'est pas bien défini par manque de compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans le matériau.

Le matériau constitutif de toute pièce soumise à des contraintes alternées subit une altération de ses propriétés. Suivant le niveau de contrainte et le nombre de cycles effectués, cette détérioration est partielle ou peut aller jusqu'à la rupture (Figure 4).

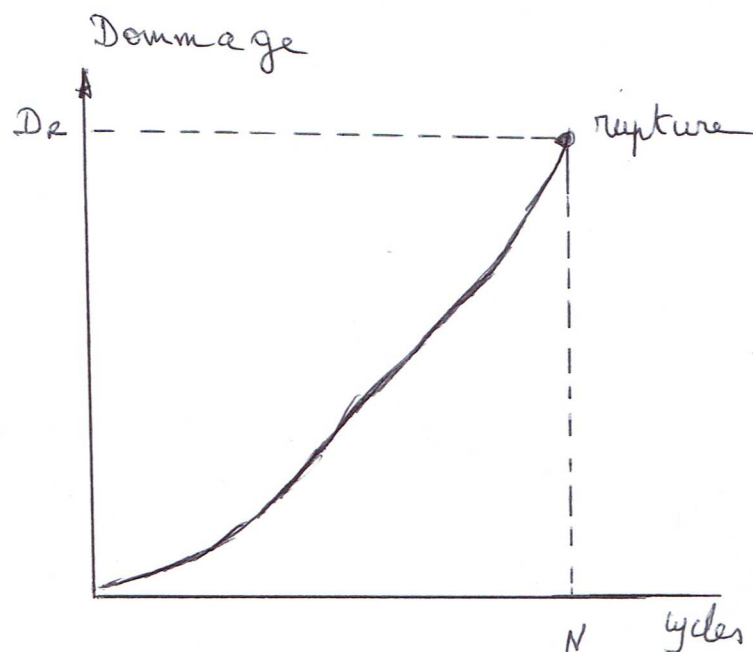


Figure 4: Accumulation des dommages par fatigue jusqu'à rupture

De façon à suivre l'évolution de l'endommagement, on définit la notion de « dommage » subi par l'éprouvette, qui peut aller de zéro à 100% au moment de la rupture. Ainsi pour suivre la progression du dommage au cours du temps, une première solution consiste par exemple à étudier l'évolution de certaines propriétés physiques de l'éprouvette.

Pendant l'essai de fatigue, il y'a apparition de fissures qui se propagent jusqu'à rupture de l'éprouvette. Cependant les fissures ne deviennent décelables et mesurables que vers la fin de la vie de l'éprouvette.

Méthode et règle de Miner

Une des règles les plus anciennes, la plus simple et la plus utilisée est la règle de Miner ou de Palmgren-Miner. Cette règle a été en réalité proposée initialement par Palmgren en 1924 puis par Langer en 1937. Elle est fondée sur les hypothèses suivantes :

- le dommage emmagasiné par le matériau à chaque cycle est uniquement fonction du niveau de la contrainte σ ; pour n cycles, on appelle dommage, endommagement, fraction de vie au niveau de la contrainte σ , la quantité :

$$d = \frac{n}{N}$$

où N est le nombre de cycles à la rupture au niveau σ .

Si W est l'énergie absorbée à la rupture après N cycles au niveau de la contrainte σ et w celle absorbée après l'application de n cycles à ce même niveau, on a :

$$\frac{w}{W} = \frac{n}{N}$$

- l'apparition d'une fissure si elle est observée, est considérée comme une rupture.

- les dommages d s'additionnent linéairement. Si k contraintes d'amplitudes σ_i , égales ou différentes sont appliquées successivement avec n_i cycles, le dommage total subi par l'éprouvette s'écrit :

$$D = \sum_{i=1}^k d_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

On suppose enfin que les endommagements se cumulent. Dans ce cas la rupture se produit pour :

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

En pratique, il serait plus correct de poser, à la rupture :

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C$$

Où C est une constante dont la valeur est fonction de l'ordre d'application des niveaux de contrainte.