

SEANCE XXII : COMPORTEMENT, ENDOMMAGEMENT ET RUPTURE PAR FATIGUE

A.-F. GOURGUES-LORENZON

INTRODUCTION

Parmi les défaillances d'origine mécanique, on considère que plus de 90% des défaillances sont dues à un phénomène redoutable : la rupture par fatigue. Celle-ci se produit sans prévenir, sans dissipation notable d'énergie et peut causer des dégâts considérables, en particulier sur des pièces tournantes. La fatigue est l'exposition à un chargement cyclique non monotone, qui comporte des phases de chargement et de déchargement (voire de chargement en sens inverse). La fatigue peut être due à plusieurs causes : une vibration normale ou anormale (apparition d'un balourd dans une pièce tournante, par exemple), des contraintes d'origine thermique (gradients de température variables dans les temps, incompatibilité de dilatation thermique...) en plus des chargements en service qui peuvent être très sévères (amortisseurs par exemple).

Le présent chapitre est centré sur les matériaux les plus sensibles à la fatigue, à savoir les métaux et alliages métalliques. Du fait de leur plasticité, qui fait appel à des mécanismes de déformation irréversibles, l'écart entre la résistance à un chargement monotone (par exemple en traction) et la résistance à un chargement cyclique est très important. Une séance de travaux dirigés abordera le cas des élastomères. Le dimensionnement en propagation de fissure est repris dans la séance de travaux dirigés sur la rupture d'un alliage d'aluminium pour application aéronautique.

Les aspects macroscopiques seront abordés en premier, avec quelques règles de dimensionnement des matériaux existants. L'étude des mécanismes de déformation et d'endommagement fournira ensuite des outils d'amélioration des matériaux.

1 ASPECTS MACROSCOPIQUES DE LA FATIGUE

L'ensemble des sollicitations cycliques que peut subir une pièce est généralement très complexe : un grand nombre de sollicitations se superposent, comme par exemple les cycles de pressurisation et dépressurisation, les vibrations, les passages dans des conditions météorologiques difficiles pour les fuselages aéronautiques. Il existe 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. Dans la suite de ce chapitre, nous ne considérerons que des cycles tous identiques, de forme triangulaire ou sinusoïdale, qui sont à la base de la plupart des essais de fatigue.

Une simplification supplémentaire sera adoptée en considérant que le type de chargement (traction, flexion, torsion...) et les directions principales de ce chargement sont constantes durant l'essai de fatigue.

On considère donc un chargement du type de celui présenté sur la Figure 1. 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 , sont donnés par les formules suivantes :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{et} \quad R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad [1]$$

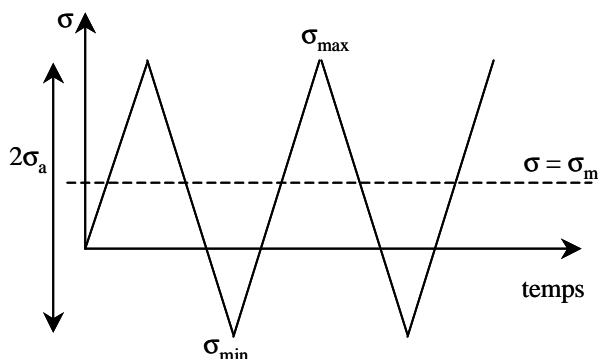


Figure 1 : Chargement d'une éprouvette de fatigue à contrainte imposée.

1.1 COURBES DE DUREE DE VIE

Les courbes reliant le nombre de cycles à rupture, N , au niveau de chargement appliqué sont largement utilisées pour le dimensionnement des pièces qui travaillent en fatigue. On distingue les essais menés à charge imposée et les essais menés à déformation totale imposée.

La courbe dite « S-N » ou « courbe de Wöhler » est exprimée en contraintes (Figure 2). On utilise une échelle logarithmique pour le nombre de cycles à rupture, N_R , que l'on porte en abscisse : on connaît généralement le nombre de cycles visés et on souhaite connaître le niveau de chargement que la pièce est capable de supporter au cours de ces cycles. Le chargement mécanique, S , est généralement la contrainte alternée σ_a ou l'amplitude de contrainte. Ces courbes sont obtenues par des essais à fréquence élevée (typiquement 20 Hz) sur des machines de flexion, de flexion rotative (on applique un poids constant sur une extrémité de l'éprouvette maintenue en rotation), voire de traction-compression.

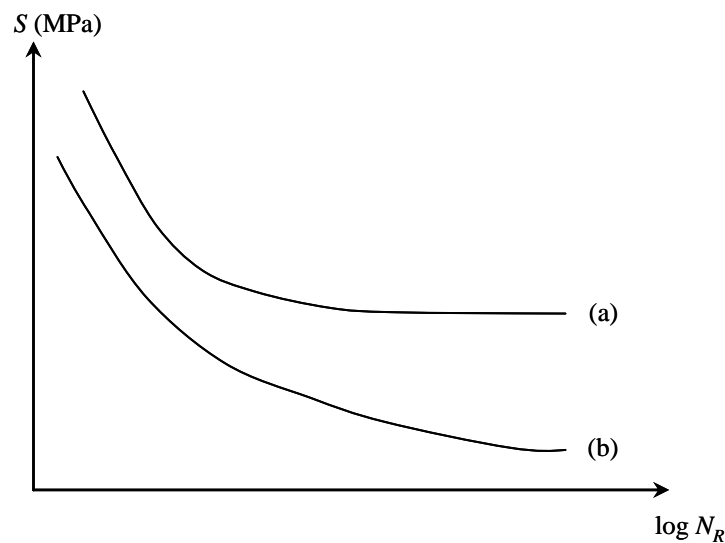


Figure 2 : Vue schématique d'une courbe S-N (courbe de Wöhler).

Deux types de comportement ont été observés pour les matériaux métalliques. La courbe (a) comporte une asymptote horizontale, appelée limite de fatigue. 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. La courbe (b) ne présente pas d'asymptote horizontale, aucune limite de fatigue ne peut être définie. 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.

Une telle courbe S-N n'est pas unique : elle dépend du rapport de charge (ou de la contrainte moyenne). Il faut donc tracer plusieurs courbes S-N avant de pouvoir dimensionner la pièce. On observe également une dispersion très élevée des résultats (typiquement d'un facteur 10 sur le nombre de cycles à rupture) qui ne peut pas être uniquement expliquée par des irrégularités aléatoires en surface (on verra dans la suite de ce chapitre que la fatigue des matériaux métalliques sollicite sévèrement les surfaces).

Il existe des méthodes statistiques (analyse du probit, méthode par escaliers) pour déterminer la limite d'endurance (ou de fatigue) avec une précision satisfaisante et un nombre raisonnable d'essais, qui pour la plupart sont longs (nombre de cycles à rupture visé supérieur à 10^7). [P. Raabe et coll.]. Le dimensionnement est réalisé en considérant la courbe médiane, assortie d'un coefficient de sécurité.

La loi de Basquin est couramment utilisée pour représenter les courbes d'endurance :

$$N_R \sigma_a^p = C \text{ où } p \text{ et } C \text{ sont des constantes liées au matériau.} \quad [2]$$

La durée de vie (nombre de cycles à rupture) diminue lorsque la contrainte augmente, pour ne valoir que 1 lorsque l'on atteint la résistance à la rupture du matériau en conditions monotones.

On distingue communément deux régimes sur la courbe S-N : pour les faibles niveaux de contrainte, les éprouvettes restent globalement élastiques et on peut analyser indifféremment en contrainte ou en déformation élastique. On parle de fatigue à grand nombre de cycles. Pour les forts niveaux de déformation ou de contrainte, l'éprouvette est plastifiée à chaque cycle et on analyse la durée de vie en termes de déformation plastique. On parle de fatigue oligocyclique ou à faible nombre de cycles.

L'effet des concentrations de contrainte (congés de raccordement sévères, assemblage mécanique...) est pris séparément en compte à l'aide des coefficients de sécurité. Afin de séparer les effets de la contrainte alternée de ceux de la contrainte moyenne, on utilise des diagrammes tels que celui de Goodman (Figure 3). Ceux-ci permettent d'utiliser la durée de vie en fatigue pour $R = -1$, notée σ_e , pour estimer la durée de vie pour d'autres valeurs de R à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_a = \sigma_e \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^x \right) \quad [3]$$

σ_u est la contrainte à rupture sous sollicitation monotone, par exemple en traction ; elle peut être prise égale à la résistance à la traction ou, dans certains cas, à la limite d'élasticité. Ces diagrammes réels ont des formes assez simples et la droite est conservatrice : on ne risque pas de sous-estimer la durée de vie en l'utilisant.

L'effet de la contrainte moyenne devient très important pour les essais de fatigue à chaud, pour lesquels une déformation supplémentaire de fluage peut accélérer la ruine de l'éprouvette.

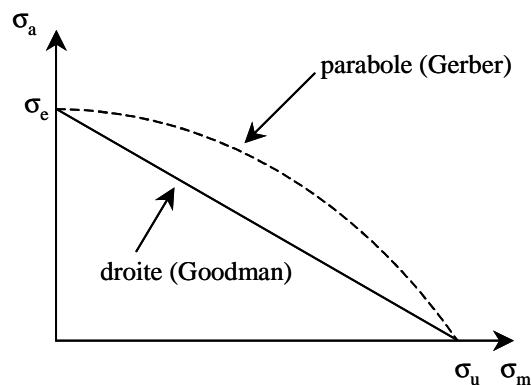


Figure 3 : Représentation schématique du diagramme de Goodman. Les deux courbes correspondent respectivement à $x = 1$ et $x = 2$ dans l'équation [3].

1.2 COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION EN FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

Avant de présenter la modélisation de la courbe S-N, il convient d'explicitier le déroulement d'un cycle de fatigue et les principales grandeurs attachées à un tel cycle (Figure 4a). Ces considérations s'appliquent uniquement aux matériaux métalliques, susceptibles de supporter une déformation plastique significative.

Lors du premier chargement, le matériau peut franchir la limite d'élasticité et s'écrouir par création et multiplication des dislocations. Au cours du déchargement, une partie de cet écrouissage peut subsister (écrouissage isotrope), une partie peut disparaître (écrouissage cinématique) en fonction des mécanismes de durcissement internes au matériau. Une déformation plastique va donc apparaître. Le chargement redevient ensuite élastique, puis conduit à une nouvelle plastification, et ainsi de suite. La forme des cycles n'est pas immédiatement stationnaire, un stade d'accommodation est souvent observé : souvent un adoucissement pour les matériaux métalliques initialement les plus durs (Figure 4b), un durcissement pour les matériaux initialement les moins durs. Les obstacles tels que les précipités cisailables seront par exemple de plus en plus faciles à franchir par les dislocations, jusqu'à leur éventuelle redissolution dans la matrice.

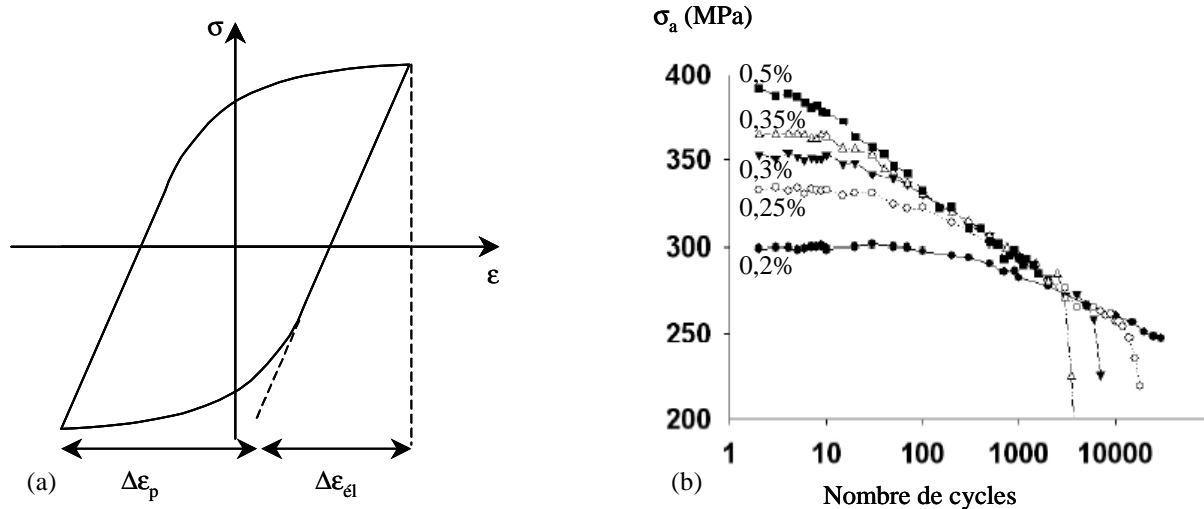


Figure 4 : (a) Représentation schématique d'un cycle de fatigue oligocyclique ; (b) Adoucissement cyclique par modification de la structure de dislocations d'un acier 9Cr-1Mo-NbV à 550°C, d'après [Fournier et coll. 2006]. La demi-amplitude de déformation totale est indiquée pour chaque courbe, la déformation moyenne étant égale à zéro.

1.3 MODELISATION DES COURBES DE DUREE DE VIE

Les deux lois données ci-dessous sont mathématiquement très simples et sont bien suivies expérimentalement. Elles ont été publiées après le début des années 1950, au cours desquelles des accidents aériens liés à la rupture par fatigue ont eu lieu faute d'un dimensionnement approprié et des précautions adéquates (voir le chapitre sur la rupture et la tolérance au dommage).

La loi empirique généralement retenue pour les faibles niveaux de contraintes est la suivante :

$$\sigma_a = E \frac{\Delta\epsilon_{el}}{2} = \sigma'_f (N_R)^b \quad [4]$$

Dans cette équation, N est le nombre de cycles à rupture, ϵ_{el} est la déformation élastique, σ'_f est une « ductilité en fatigue » (généralement l'extrapolation de la courbe pour $N_R = 1$) et b est un coefficient propre au matériau, qui vaut généralement entre -0,05 et -0,12 pour les matériaux métalliques. On prend souvent pour σ'_f la résistance à la traction.

La loi empirique généralement retenue pour les forts niveaux de contraintes est la suivante :

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (N_R)^c \quad (\text{loi de Manson-Coffin}) \quad [5]$$

Dans cette équation, N_R est le nombre de cycles à rupture, ϵ_p est la déformation plastique (Figure 4), ϵ'_f est une « ductilité en fatigue » (généralement l'extrapolation de la courbe pour $N = 1$) et c est un coefficient propre au matériau, qui vaut généralement entre -0,5 et -0,7 pour les matériaux métalliques. On prend souvent pour ϵ'_f la déformation à rupture lors d'un essai de traction.

La loi complète s'écrit en rappelant que la déformation totale est la somme de la déformation élastique et de la déformation plastique :

$$\frac{\Delta\epsilon_{totale}}{2} = \frac{\Delta\epsilon_{el}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_{pl}}{2} = \sigma'_f N_R^c + \frac{\sigma'_f}{E} N_R^b \quad [6]$$

Une représentation en fonction de l'amplitude de la déformation totale est donnée sur la Figure 5.

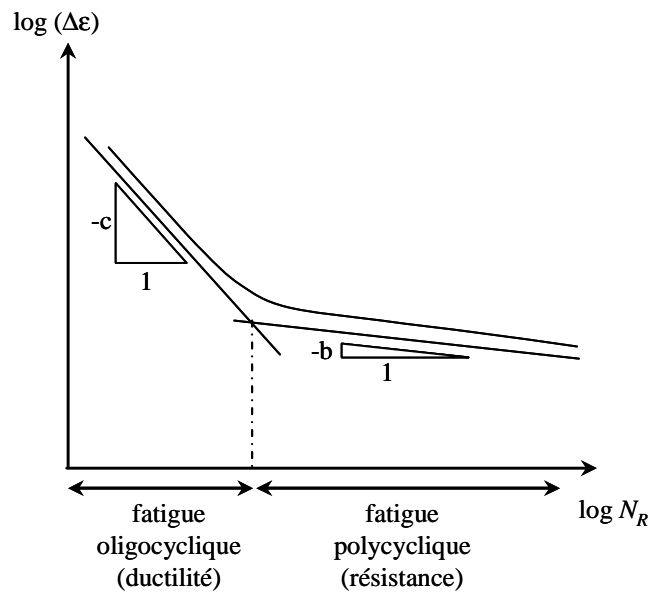


Figure 5 : Estimation de la durée de vie en fatigue en fonction de l'amplitude de la déformation imposée

2 MECANISMES DE RUINE PAR FATIGUE

On distingue généralement quatre étapes dans le processus de ruine par fatigue sur une éprouvette initialement non fissurée.

La première étape est l'amorçage de la fissure. Il a presque toujours lieu en surface dans les matériaux métalliques ou éventuellement à une discontinuité proche de la surface (gros précipité, gros oxyde, interface entre deux couches de duretés différentes...), qui conduit localement à une forte concentration des contraintes. 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. Les structures de déformation (« en échelle » avec des parois de dislocations et des canaux vides de dislocation sur les métaux de structure cubique à faces centrées, en bandes dénudées de précipités pour les alliages à précipités cisailables...) forment des bandes de glissement persistantes, dans lesquelles la déformation se localise peu à peu. Le cumul de déformation cyclique donne naissance à de petites extrusions de ces bandes ou, à l'inverse, de minuscules entailles (intrusions), toutes deux servant d'amorces de fissures de fatigue.

La deuxième étape, dite « stade I », est la propagation d'une ou plusieurs petites fissures, généralement dans les bandes de glissement persistantes ou tout au moins selon les plans de glissement de la structure cristalline. Les microfissures se propagent très lentement (de l'ordre du nm/cycle) et sont souvent arrêtées par les joints de grains qu'elles ne peuvent pas franchir facilement si le grain adjacent n'est pas favorablement orienté (Figure 6). Elles sont très difficiles à détecter par des examens non destructifs.

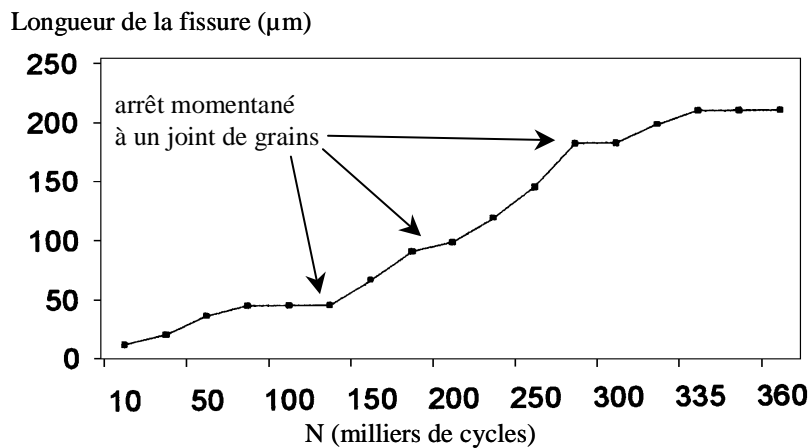


Figure 6 : Evolution de la longueur d'une fissure dans un alliage Al-7Si-0,3Mg de fonderie, à très gros grains. Les arrêts momentanés de la fissure ont été reliés au franchissement des joints de grains. D'après [Buffière et coll. 2001].

La troisième étape, dite « stade II », est la propagation d'une fissure plus longue, qui cette fois suit le plan orthogonal à la plus grande contrainte principale (positive). La fissure est beaucoup plus facile à détecter que dans l'étape précédente, elle risque en revanche de conduire rapidement à la rupture. La vitesse de propagation lors du stade II est de l'ordre du $\mu\text{m}/\text{cycle}$. La fissure se propage par une succession d'éroulements (par déformation plastique) et de pincements (lors des déchargements). Des stries, caractéristiques de la rupture par fatigue, sont souvent visibles sur les surfaces de rupture. Une strie représente généralement un cycle de fatigue.

La dernière étape est la rupture finale : lorsque la section portante, qui se réduit à mesure que la fissure progresse, ne peut plus supporter le chargement appliqué, la pièce rompt, généralement de manière ductile.

La surface de rupture comporte donc une zone d'amorçage (sur une piqûre de corrosion, un gros précipité, une entaille sévère, etc...), une zone de propagation par fatigue et une zone de rupture ductile finale (Figure 6).

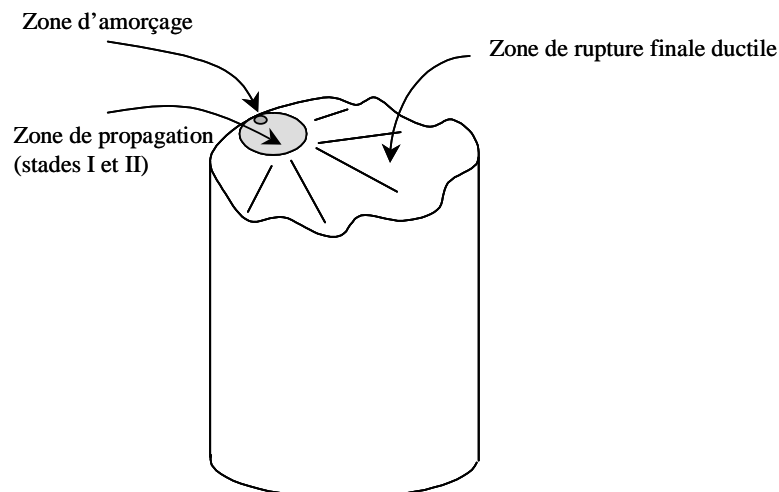


Figure 6 : Aspect général d'une surface de rupture après défaillance due à un phénomène de fatigue

3 VERS UNE AMELIORATION DE LA TENUE EN FATIGUE DES ALLIAGES METALLIQUES

La durée de vie en fatigue polycyclique est fortement influencée par l'amorçage des fissures et leur propagation en stade I. Plus un matériau est résistant à la déformation plastique, moins une fissure pourra s'y amorcer. Il peut être intéressant de favoriser une faible taille de grains, qui augmente la résistance locale au passage des dislocations (effet Hall-Petch) et diminue le libre parcours moyen des fissures en stade I.

Les contraintes résiduelles jouent un rôle de tout premier plan lors de l'amorçage des fissures. L'état de contraintes en surface est également très important : des contraintes de compression (introduite par grenailage, traitement thermochimique...) sont bénéfiques, alors que les contraintes de traction (introduites par exemple par usinage) sont très néfastes envers la tenue en fatigue. C'est pourquoi certaines pièces critiques (par exemple les assemblages rivetés pour fuselage aéronautique, les ressorts de suspension automobile) sont grenillées par projection de billes dures, afin d'établir en surface des contraintes résiduelles de compression qui limitent l'amorçage des fissures de fatigue. Les pièces d'engrenage (dents de pignons) subissent un traitement thermochimique (pénétration de carbone ou d'azote à chaud, suivie d'une trempe) destinée à les durcir superficiellement et à introduire des contraintes résiduelles de compression, très bénéfiques à leur tenue en fatigue. A l'inverse, l'usinage d'une pièce sollicitée en fatigue doit être particulièrement soigné pour éviter l'amorçage prématuré d'une fissure.

Il convient enfin de rappeler que la sollicitation en fatigue intervient rarement seule : on y associe fréquemment la corrosion qui favorise l'amorçage des fissures, le fluage pour les essais à chaud et à contrainte moyenne élevée ainsi que le frottement à faibles débattements (fretting) qui est une cause non négligeable de rupture par fatigue.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J.-Y. Buffière, S. Savelli, P.H. Jouveau, E. Maire, R. Fougères, *Materials Science and Engineering A316* (2001) 115–126**
- G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw-Hill, New York (1986), chapitre 12, 375-431**
- B. Fournier, M. Sauzay, C. Caës, M. Mottot, *Materials Science & Engineering A437* (2006), pp. 183-196.**
- J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet, P. Combrade, *Métallurgie, du minerai au matériau*, Masson (1998), chapitre 7, 863-878**
- P. Raabe, H.P. Lieurade, A. Galtier, *Essais de fatigue - Partie I*, Techniques de l'ingénieur, fiche M4170**

