II. Phénomène de fatigue.

II.1.Introduction

La fatigue est généralement définie comme étant un mécanisme à travers lequel les fissures se développent et se propagent dans une structure. La propagation de fissures est enregistrée dans les structures soumises à des charges fluctuantes, ce qui conduit dans la plus part des cas à la rupture brusque. Par contre, dans les conditions normales où le chargement sur la structure est stationnaire, la fissure ne se propage pas, c'est le cas des structures en charpentes par exemple. D'autres le font, comme les ponts, les grues et les structures offshore, où la charge vive est plus élevée que la charge totale. C'est dans ce contexte que nous allons étudier l'effet de l'état de surface (rugosité) sur la résistance à la fatigue dans le domaine oligocyclique c'est-à-dire aux hautes charges.

De ce fait, il est important de savoir qu'une structure est conçue dans le but d'accomplir une ou plusieurs fonctions. Certaines structures sont soumises à des chargements mécaniques statiques, alors que d'autres sont soumises à des chargements dynamiques. Pratiquement les structures de la première catégorie durent plus longtemps ce qui justifie le dimensionnement en fonction de la résistance ou la rigidité lors la phase de conception.

Un chargement dynamique variable peut conduire à des variations cycliques de contraintes. Ces sollicitations dynamiques sont souvent à l'origine de la rupture brusque des structures qui peut arriver même à des charges inférieures à la limite élastique du matériau constituant la structure, c'est le phénomène de fatigue.

Ce phénomène est imprédictible car il se développe lentement à l'intérieure de la structure et dans le temps sans donner de modification macroscopique au niveau de la structure.

La prise en considération de la résistance en fatigue lors de la phase de conception d'une structure ou d'une pièce parait indispensable.

Ce chapitre va donner une étude générale sur le phénomène de fatigue ainsi que les solutions proposées pour faire face à ce phénomène.

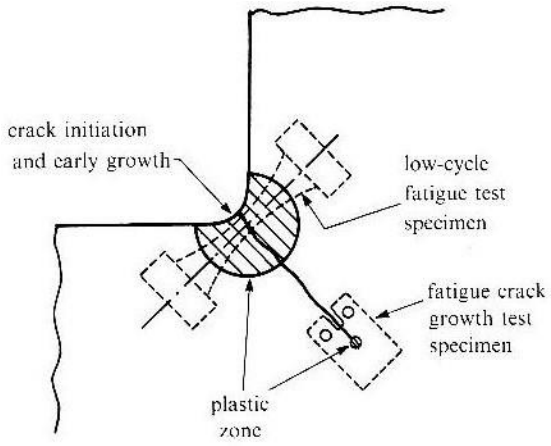


Figure 2.1. Diagramme schématique illustrant les différentes étapes de la fatigue d'un composant et les approches pour estimer les durées de vie en fatigue d'après Coffin [6].

II.2.Le mécanisme de la fatigue :

Considérons une structure soumise à un effort cyclique agissant jusqu'à la rupture (après un nombre de cycles donné). (Figure2.2)

L'endommagement est imprévisible, il peut naitre (à l'échelle microscopique) souvent à la surface de la pièce comme il peut naitre à l'intérieur. L'endommagement peut engendrer trois stades:

- **Amorçage :**

Il est difficile de repéré le défaut initié à cause de sa grande finesse et sa détection n'est seulement possible que lorsqu'on utilise des équipements très puissants. L'apparition du défaut peut avoir lieu dans des endroits où il est difficile d'accéder.

La zone d'amorçage est repérée par zone 1. (Figure 2.2)

- **Propagation :**

  Sous l'effet de chargement fluctuant, la fissure grandit et va se propager rapidement dans la structure, ce qui conduit à la rupture brusque.

Ce stade correspond à la zone 2.(Figure.2.2)

- **Rupture brusque:**

Lorsque la fissure atteint une distance de telle sorte que la section résiduelle est trop petite pour supporter de fortes contraintes résultant d'une concentration au fond de la fissure(Figure.2.2)

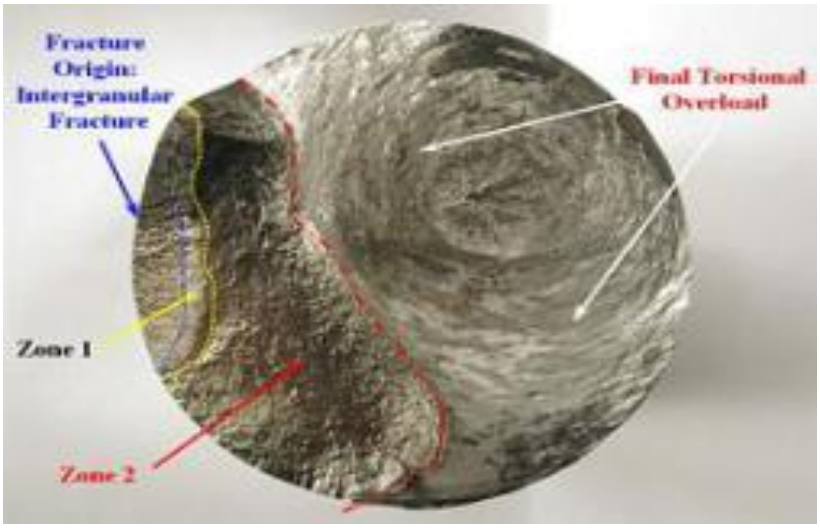


Figure 2.2 Faciès de rupture d'un arbre de transmission de voiture de course [7].

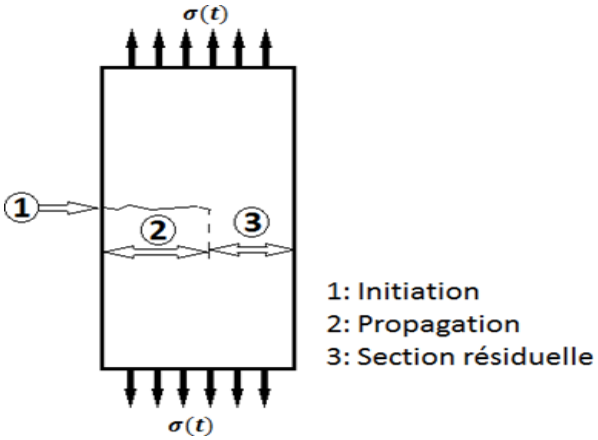
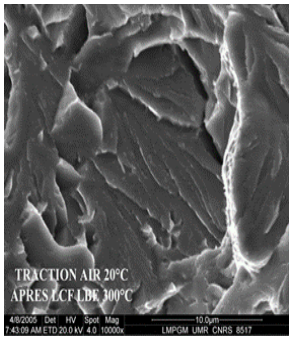
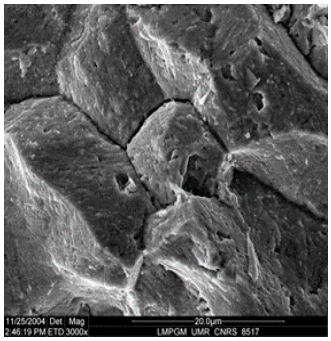
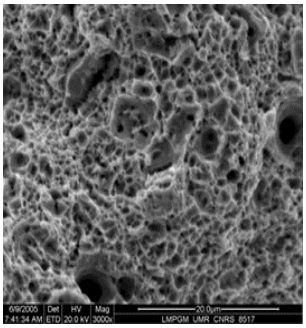


Figure 2.3. La section résiduelle [7].

II.3.Les modes de rupture :

Les aciers peuvent se rompre selon deux modes de rupture : fragile et ductile

Tableau 2.1 : Présentation des différents modes de rupture.

	fragile		**ductile**
Manifestation macroscopique	Pas de déformation plastique généralisée Faible énergie de rupture Rupture rapide sans signe avant-coureur.		Déformation plastique Energie de rupture élevée Détection de l'endommagement possible
Manifestation microscopique	 **rupture transgranulaire ou clivage** Décohésion selon les plans cristallographiques denses.	 **rupture intergranulaire** Décohésion aux joints de grains.	 Germination, croissance de microcavités.

II.4.Mécanisme de la rupture fragile et ductile :

II.4.1.Rupture fragile

Les mécanismes avancés pour expliquer les ruptures ductiles et fragiles des aciers sont succinctement évoqués ci-dessous :

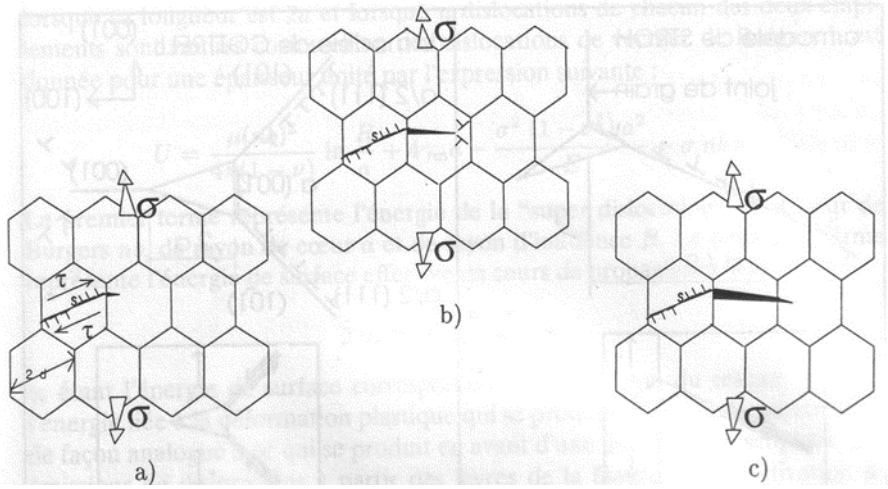


Figure 2.4 : Schéma d'une rupture fragile (a) amorçage (b) propagation (c) franchissement d'un joint de grain [6].

La Figure 4 présente un modèle possible de rupture fragile par clivage en trois étapes :

- Sous l'action d'une sollicitation extérieure, une microfissure de clivage est amorcée (« amorçage ») à la tête d'un empilement de dislocations (a).
- Cette fissure se propage ensuite à l'intérieur d'un grain (« propagation ») (b).
- Puis elle traverse un joint de grains (« franchissement de joint de grains ») (c).

Ces trois étapes étant réalisées, la fissure continuera à se propager naturellement à travers le matériau de manière identique si la sollicitation extérieure n'est pas diminuée.
Différents modèles permettent d'expliquer les empilements de dislocations conduisant à la rupture en faisant intervenir différents types d'obstacles ont été proposés (Figure 5) :

- joint de grains (modèle de Stroh).
- dislocations sessiles (modèle de Cottrel).
- carbures (modèle de Smith).

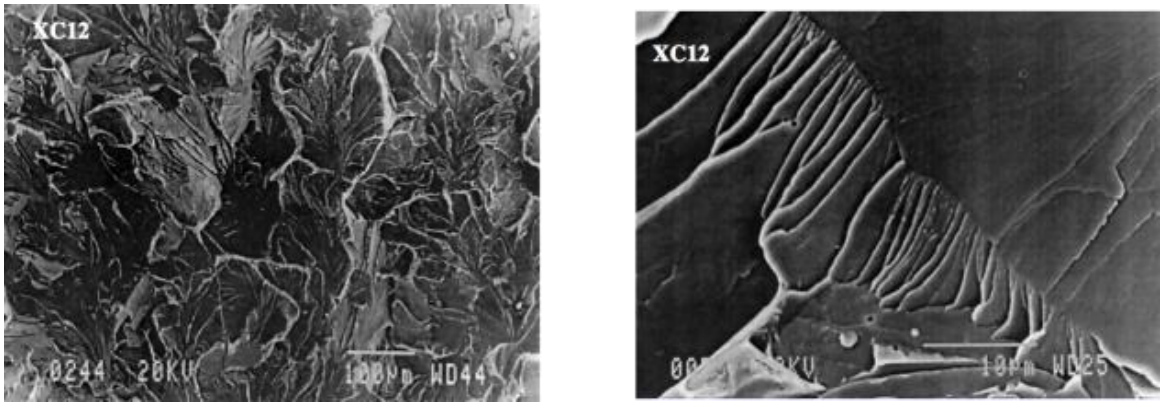


Figure 2.5: Faciès d'une rupture fragile par clivage[8].

II.4.2.Rupture ductile

La rupture ductile est le mode de rupture à température chaude des aciers. La ductilité est liée à une plasticité importante. En règle générale, la rupture résulte de la germination, croissance et coalescence de cavités amorcées sur des inclusions, précipités ou autres défauts àl'échelle microscopique. Ces cavités ont pour origine la décohésion inclusion/matrice ou la rupture de l'inclusion. Leur croissance résulte de la déformation plastique, et leur coalescence s'accompagne d'un phénomène d'instabilité plastiquelocal. La surface de rupture résultant de ces mécanismes présente un aspect de cupules au fond desquelles on peut généralement observer l'inclusion d'origine. En présence d'un défaut de type fissure, ces trois étapes de la rupture ductile se succèdent en avant du front, là où la déformation plastique est importante, impliquant ainsi une avancée continue du défaut (Figure 2.6).

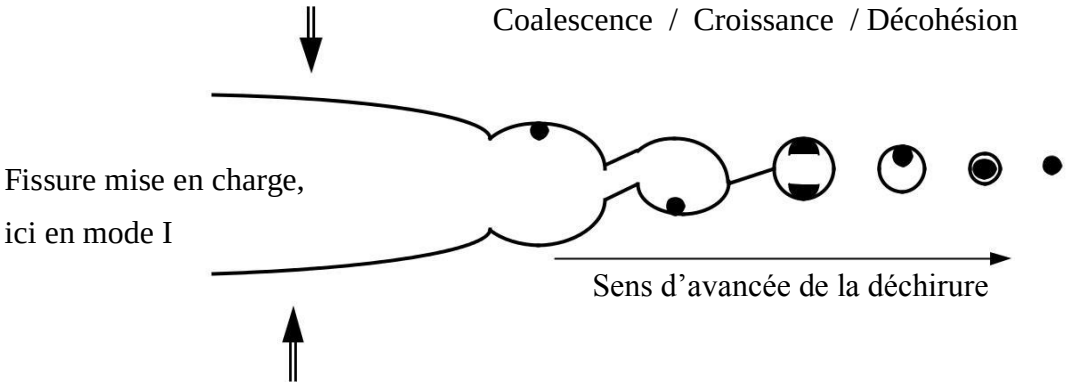


Figure 2.6 : Mécanismes de la déchirure ductile [9].

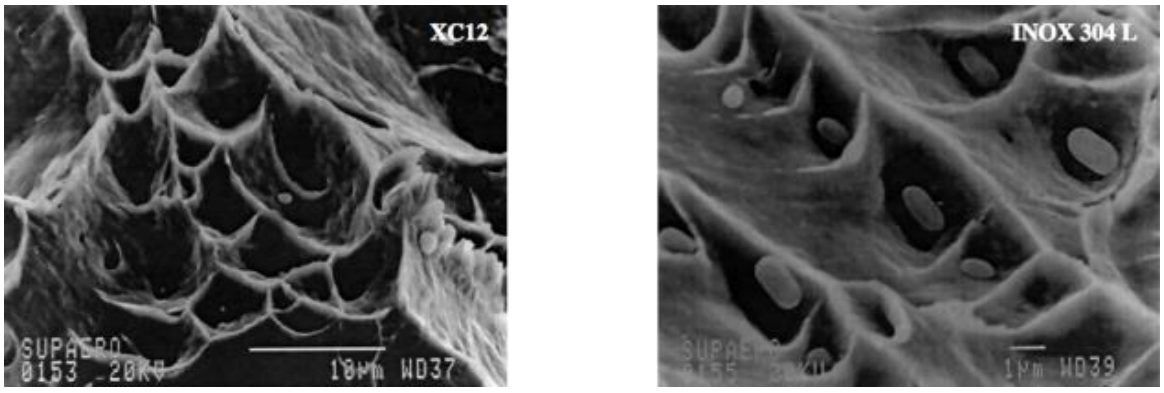


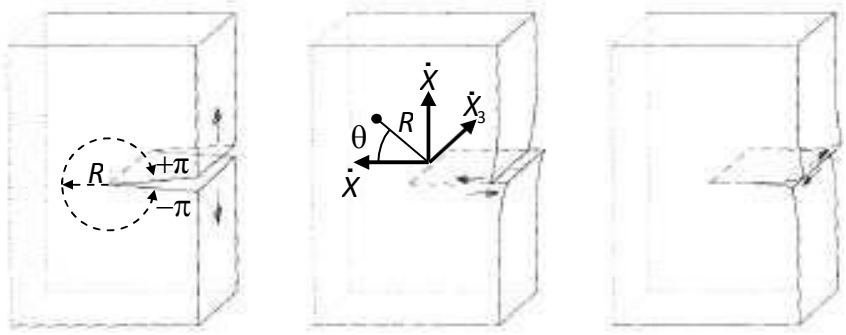
Figure 2.7 : Faciès d'une rupture ductile [8].

II.5. Modes de sollicitation de rupture

Si on considère une fissure dans un plan, on distingue selon la direction de sollicitation trois modes de déplacement des lèvres de la fissure. Ces modes indiqués sur la (figure2.8) correspondent à différentes cinématiques de déplacement des lèvres de la fissure :

- **Mode I ou mode d'ouverture** ; le champ de déplacement relatif des lèvres de la fissure est défini par : $u1 = 0, \quad u2(x1) \neq 0 \quad , \quad u3 = 0$
- **Mode II ou mode de cisaillement plan** ; le champ de déplacement relatif des lèvres de la fissure est défini par : $u1(x) \neq 0, \; u2 = 0 \quad , \quad u3 = 0$

- **Mode III ou mode de cisaillement antiplan** ; le champ de déplacement relatif des lèvres de la fissure est défini par : $u1 = 0,\ u2 = 0\ ,\ u3(x) \neq 0$



(a) Mode I (b) Mode II (c) Mode III

Figure 2.8 Modes de sollicitation d'une fissure : a- mode I ou mode d'ouverture b- mode II ou de cisaillement plan c- mode III ou de cisaillement antiplan [10].

Les modes I et II correspondent à des sollicitations planes, ce qui n'est pas le cas du mode III. Le mode I conduit à une discontinuité des déplacements selon la direction

$x2 = u(r, -\pi) = -u(r, \pi)$; alors que dans le mode II, la discontinuité est selon la direction

$x1 = (r, -\pi) = -u(r, \pi)$

Les modes II et III se produisent lorsque les fissures sont soumises à des contraintes cycliques de cisaillement. Cependant, l'expérience montre que les fissures qui s'amorcent sous ces modes de sollicitations, ont tendance très rapidement à se propager perpendiculairement à la direction de sollicitation, c'est-à-dire en mode d'ouverture qui est le plus endommageant.

Les fissures en service ne se présentent pas toujours dans la configuration schématisée sur (la figure 2.8) Lorsqu'elles sont suffisamment longues, elles traversent en général les structures minces telles des plaques, par exemple. Dans les structures plus épaisses, elles peuvent être de coin ou de surface. La (figure 2.9) montre par exemple les différentes configurations de fissures que l'on peut observer au voisinage d'une entaille circulaire. Une fissure traversante avec un front bien défini est généralement traitée comme un

problème bi dimensionnel. Pour les fissures de coin ou de surface, on a recours à des calculs tri dimensionnels pour déterminer les champs de contraintes et de déplacements.

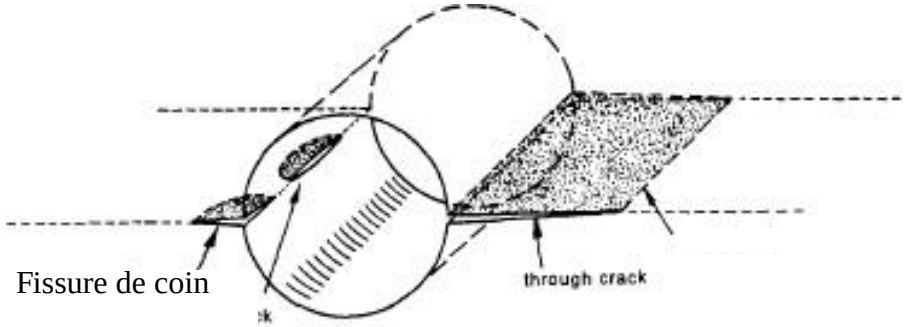


Figure 2.9 Différentes configurations de fissures au voisinage d'un trou circulaire [10]

II.6.Les paramètres d'influence en fatigue

II.6.1.Paramètres d'ordre métallurgique

a. Taille des grains

Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que lesstructures à gros grains.

b.Orientation des grains par rapport à la direction des efforts

L'orientation générale des grains confère au matériau une anisotropie plusou moins marquée. Les caractéristiques statiques et la tenue en fatigue serontmeilleures dans le sens de l'orientation des grains que dans les autres sens (travers long ettravers court).

c. Taux d'écrouissage

L'écrouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider lematériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue enfatigue.

d. Traitement thermique

Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou undurcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus,le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

e. défauts métallurgique :

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions)peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité desdéformations, ils provoquent des concentrations de contraintes locales. L'abattement dedurée de vie dépendra de leurs quantités, taille, nature, répartition, orientation parrapport aux efforts.

II.6.2.Paramètres d'ordre mécanique et géométrique

a. Nature du chargement

Le chargement peut être monotone ou variable (et même aléatoire, spectre). Dans lecas des chargements monotones les paramètres prépondérants sont :

- la forme du signal : un signal de type carré est plus pénalisant que celui de typesinusoïdal;
- le rapport R (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale duchargement) : à contrainte maximale constante, si R augmente, la durée de vieaugmente;
- la contrainte moyenne : à amplitude de chargement constante, si σm augmente,la durée de vie diminue.

Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

- la présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peutretarder la propagation de fissures.
- l'ordre d'apparition des cycles.

b. Discontinuité dans la géométrie :

La discontinuité dans la géométrie : entailles, trous…, peut conduire à l'augmentation de la contrainte traduite par un coefficient de contrainte élastique K_t: rapportentre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale. Dans le domaine d'endurance limite, si la valeur de $K_t$augmente, la durée de vie diminue.

c. Effet d'échelle

A niveau de contrainte égale, deux pièces de même géométrie mais de dimensions différentes n'auront pas la même tenue en fatigue : plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Cette observation s'explique principalement par le volume de matière sollicité : plus ce dernier est important, plus la probabilité d'avoir des défauts métallurgiques est grande.

d. Qualité de l'usinage

Généralement, l'endommagement par fatigue apparaît en premier lieu à la surface des pièces. La prise en compte des deux aspects suivants améliore la tenue en fatigue :

- l'aspect micro géométrie de la surface : un mauvais usinage provoque en surface des microreliefs susceptibles d'augmenter localement le niveau de contrainte ; l'amorçage des fissures en surface est donc retardé lorsque la rugosité est faible ;
- l'aspect contraintes résiduelles : l'usinage peut introduire des contraintes résiduelles de traction en surface (elles sont équilibrées en profondeur par des contraintes résiduelles de compression), ces contraintes se superposant à celles du chargement et accélèrent l'endommagement par fatigue.

II.7.La courbe de Wöhler ou courbe S – N

La courbe de Wöhler ou courbe SN (Stress= contrainte, N= nombre de cycles) représente l'amplitude de contrainte (ou la contrainte maximale) en fonction du nombre de cycles supportables (échelle logarithmique) par le matériau ou la pièce jusqu'à un critère de ruine donné (souvent la rupture en deux parties de l'éprouvette ou de la pièce si rien n'est précisé).

Cette courbe n'a de sens que sous chargement d'amplitude constante.

Pour les aciers on observe dans de nombreux cas une tendance asymptotique pour les durées supérieures à environ 5.10^6 cycles. Le niveau de contrainte correspondant est appelé limite d'endurance. Ce concept est à manipuler avec précaution car depuis une quinzaine d'années des travaux de recherche ont montré que dans certains cas des ruptures par fatigue peuvent survenir après 10^8, 10^9 ou10^{10} cycles. On parle alors de fatigue

gigacyclique. Par ailleurs il est connu depuis très longtemps que la courbe de Wöhler n'a pas d'asymptote pour les alliages d'aluminium.

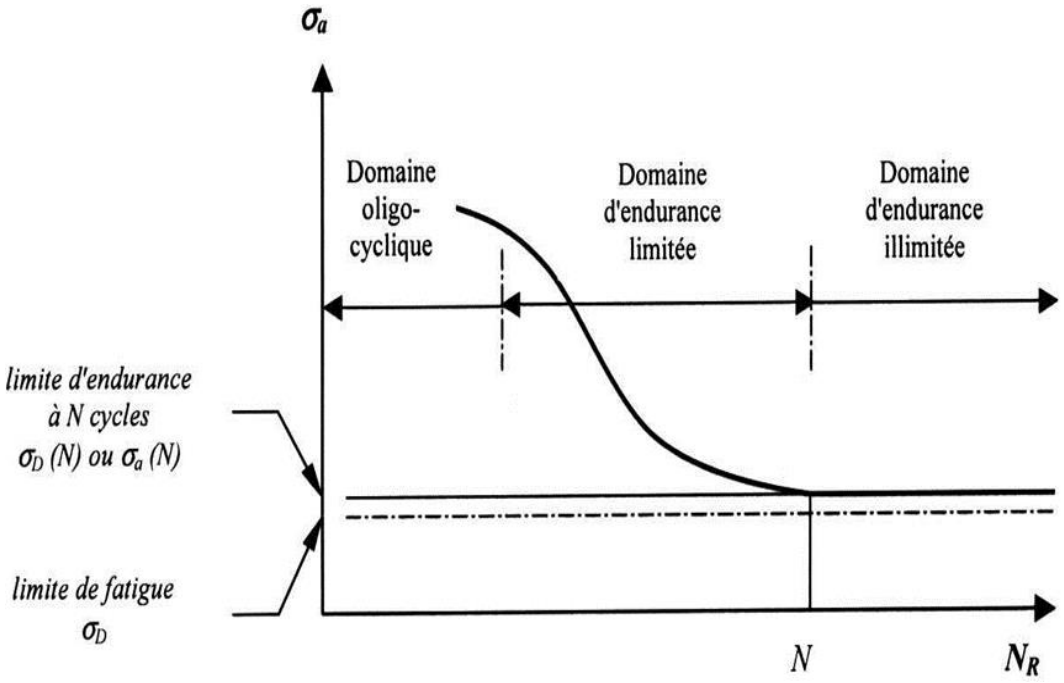


Figure2.10 : Courbe de Wöhler [11].

II.7.1.Les 3 domaines de la courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler est constituée de trois domaines de durées de vie :

- le domaine de la fatigue oligocyclique correspond aux durées de vie courtes (moins d'environ 10^4 à 10^5 cycles): le matériau est cyclé dans son domaine plastique. Des déformations plastiques macroscopiques apparaissent à chaque cycle de chargement
- le domaine de l'endurance limitée: c'est un domaine intermédiaire entre la fatigue oligocyclique et le domaine des grandes durées de vie.
- le domaine des grandes durées de vie: au-delà de 10^6à 10^7 cycles selon les métaux, où le matériau est cyclé dans son domaine d'élasticité macroscopique. Aucune déformation plastique macroscopique cyclique n'est mesurée.

II.7.2. Modèles mathématiques de la courbe de Wöhler

A titre d'information ce transparent présente quelques modèles analytiques de courbes de Wöhler (ou courbe SN). Ceux encadrés en rouge sont les plus utilisés industriellement: S désigne la contrainte (amplitude ou contrainte maximale selon le choix de l'utilisateur du modèle) a et b sont des constantes à identifier d'après un ensemble de résultats d'essais. Wöhler et Basquin ne considèrent pas d'asymptote Bastenaire considère qu'une asymptote (E) existe.

Modèles de courbe de Wöhler ou courbe S-N (Wöhler curve, S-N curve)

Wöhler (1860)	$\log(N) = a - b\,S$
Basquin (1910)	$\log(N) = a - b\log(S)$
Stromeyer (1914)	$\log(N) = a - b\log(S-E)$
Palmgreen (1924)	$\log(N+b) = a - b\log(S-E)$
Corson (1955)	$N = \frac{A}{(S-E)} e^{-C(S-E)}$
Bastenaire (1974)	$N = \frac{A}{(S-E)} e^{-\left(\frac{(S-E)}{B}\right)^{C}}$

II.7.3.Origine de la dispersion en fatigue

Une courbe de Wöhler n'est connue expérimentalement que jusqu'à un nombre de cycles donné (appelé « censure des essais ») car il faut bien que les essais soient faits en un temps limités. Il est maintenant admis que pour les métaux (cadre de ce cours), la résistance en fatigue (amplitude de contrainte) pour une durée de vie donnée peut être décrite par une loi normale (au gaussienne) quel que soit le domaine de durée de vie. Par

contre, la durée de vie suit une loi log-normale en endurance limitée et l'inverse de la durée de vie (1/N) suit une loi log-normale pour les grandes durées de vie.

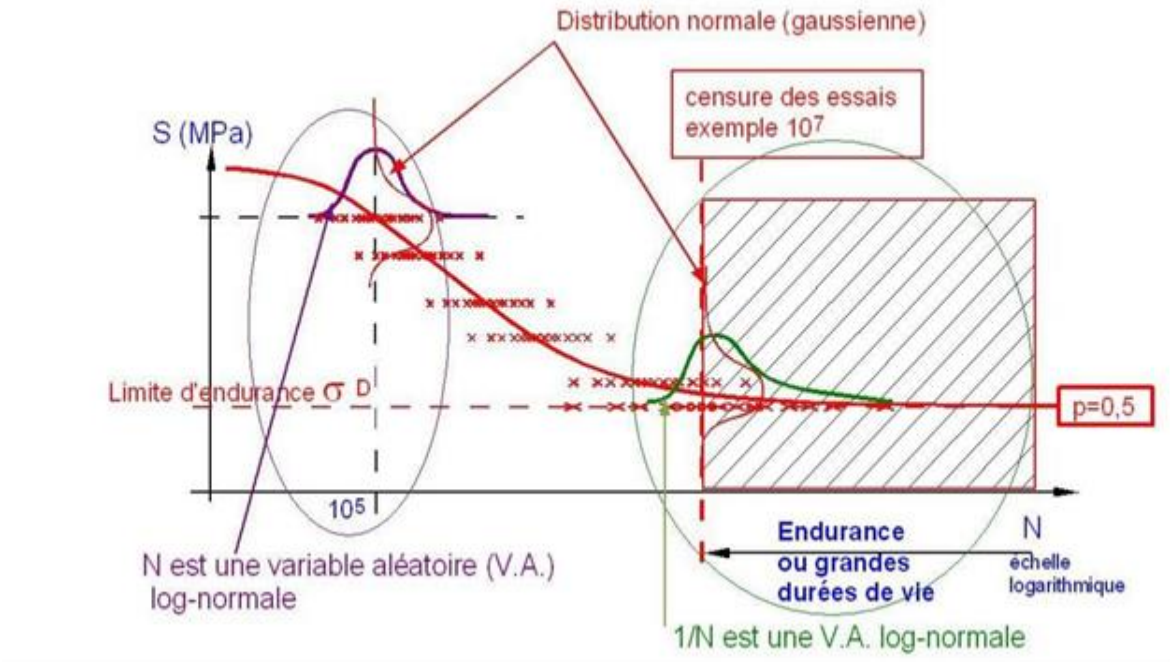


Figure 2.11 : Probabilités et courbe de Wöhler [12].

II.8.Théorie statique de la fatigue des métaux

II.8.1.Fatigue et endurance

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux, consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle σmax par la valeur moyenne de la contrainte σm et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximal R=σ min\σ max

D'une façon très générale, la fatigue est prononcée chaque fois que le matériau est soumis à des efforts variables dans le temps. Dans cet état de cause, la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à

la résistance à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois.

II.8.2.Limite de fatigue

Pour une contrainte moyenne $\sigma_m$donnée, c'est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycle. Dans le cas particulier des aciers, il est expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à 10^7 cycles. En revanche, pour les aciers en présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane, cette limite de fatigue reste théorique et sans intérêt puisque tous les mécanismes ont une durée de vie limitée par suite de l'usure, la corrosion ou d'autres causes inhérentes à leur service même ; on est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance.

II.8.3.Limite d'endurance

Pour une contrainte moyenne σm, la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations. La limite d'endurance en contraintes purement alternées s'écrit σD(N).

Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques. Dans le cas des aciers, la censure est généralement de 107 cycles, mais on peut déterminer expérimentalement la limite d'endurance pour des censures différentes, suivant la nature du matériau ou de la pièce essayée. Ce sera par exemple 107 cycles pour un rail de chemin de fer, 2×106 cycles pour une pièce soudée.

II.8.4.Types de cycles de contraintes

II.8.4.1.contrainte purement alternée : contrainte qui varie entre des valeurs égales, dans le sens positif et négatif ;

II.8.4.2.contrainte alternée : contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes (0 <σm<σa) ;

II.8.4.3.contrainte répétée : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive, ou entre 0 et une valeur minimale négative (σm=σa) ;

II.8.4.4.contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe (σm>σa).

II.9.Fatigue Oligocyclique :

II.9.1.Définition: La fatigue du cycle bas a deux caractéristiques fondamentales: la déformation plastique dans chaque cycle; et un phénomène de cycle bas, dans lequel les matériaux ont une endurance finie pour ce type de charge.

L'étude de la fatigue s'est concentrée principalement sur deux domaines: l'application dans la conception en ce qui concerne la taille dans l'aéronautique et la production d'énergie en utilisant des méthodes de calcul avancées. Le résultat LCF nous permet d'étudier plus en profondeur le comportement du matériau pour mieux comprendre les phénomènes mécaniques et métallurgiques complexes (propagation des fissures, adoucissement, concentration des déformations, durcissement au travail, etc.).

II.9.2.Les Caractéristiques de la fatigue oligocyclique

Lorsqu'un composant subit une fatigue à cycle lent, il est déformé plastiquement à plusieurs reprises. Par exemple, si une pièce devait être chargée en tension jusqu'à ce qu'elle soit déformée en permanence (déformée plastiquement), cela serait considéré comme un demi-cycle de fatigue à cycle lent, ou LCF. Afin de compléter un cycle complet, la pièce devrait être déformée dans sa forme d'origine. Le nombre de cycles LCF qu'une pièce peut supporter avant d'échouer est beaucoup plus faible que celui d'une fatigue régulière.

Cette condition de contrainte cyclique élevée est souvent le résultat de conditions de fonctionnement extrêmes, telles que des changements importants de température. Les contraintes thermiques provenant d'une dilatation ou d'une contraction des matériaux peuvent exacerber les conditions de charge sur une pièce et les caractéristiques du LCF peuvent entrer en jeu.

II.10.Notions d'adaptation, d'accommodation et de déformation progressive

Avant de présenter les essais qui permettent de caractériser le matériau en fatigue oligocyclique, il est nécessaire d'introduire quelques notions décrivant les différents comportements des matériaux.

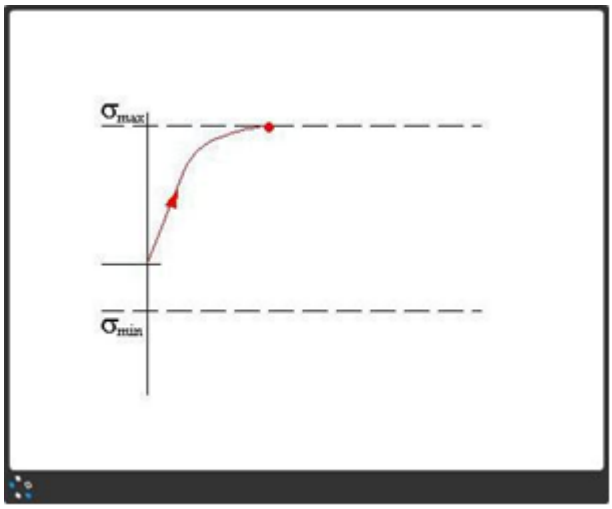
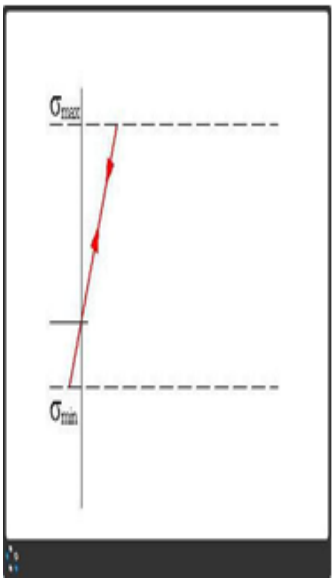


Figure 2.12 cas de ruine plastique [11].

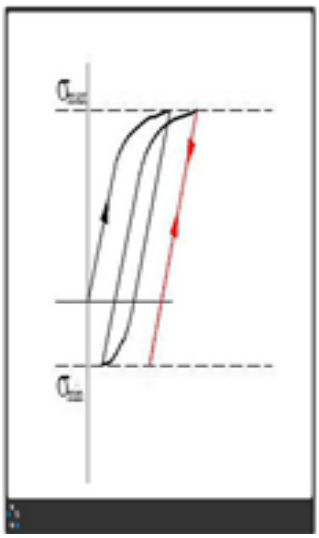
Le cas le plus connu est celui qui conduit à la ruine plastique lors d'un chargement monotone.Considérons qu'un chargement périodique est appliqué à une structure et ne conduit pas immédiatement à la ruine plastique. Quatre cas sont alors observés :

- Le premier cas possible est le comportement élastique. C'est typiquement ce que l'on observe lors d'un essai de fatigue à grande durée de vie sur éprouvettes lisses.
- Le second cas possible correspond au phénomène d'adaptation. Lors du premier cycle de chargement, la limite d'élasticité du matériau est dépassée et une déformation plastique est observée. Cependant, après un certain nombre de cycles de chargement, le comportement du matériau redevient élastique.
- Si, lors des cycles de chargement successifs, le comportement du matériau reste plastique tout en décrivant une courbe d'hystérésis qui se stabilise, on parle d'accommodation.

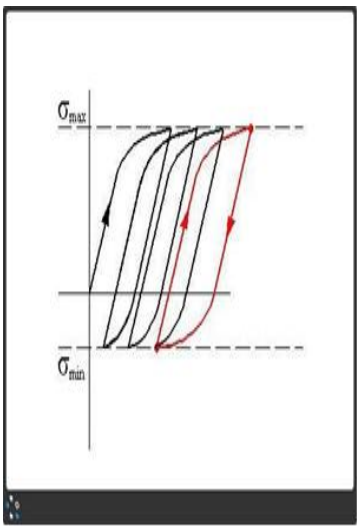
- Un dernier cas peut être observé, celui de la déformation progressive ou rochet pour lequel la déformation du matériau augmente à chaque cycle de chargement, ce qui conduit à une ruine de la structure.

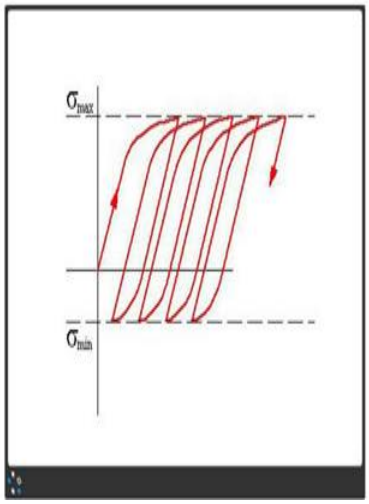


(a) Comportement élastique



(b) adaptation





(c) Accommodation(d)Déformation progressive

Figure 2.13 Les cas observés de la ruine plastique [11]

II.11.Diagramme de Haigh

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte σ_a est portée en fonction de la contrainte moyenne à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue (figure 2.13).

Deux points particuliers sont à considérer :

- le point A, qui représente la limite d'endurance σD en sollicitation purement alternée (σD = OA).
- le point B, qui représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond donc, à la contrainte de rupture du matériau au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne, se placent alors sur une courbe AB ajustée en fonction des résultats d'essais. Le domaine limité par cette courbe AB et les deux axes de coordonnées, représentent le domaine de fonctionnement autorisé avec le matériau pour avoir une durée de vie supérieure ou égale aux nombres de cycles pour lequel a été déterminée la limite d'endurance [7].

Sur ce diagramme on utilise parfois des « rayons » qui représentent le rapport entre σa et σm. Ces rayons sont alors paramétrés en fonction des valeurs que prennent ce rapport.

Le diagramme de Haigh peut être ensuite limité par la droite représentant la limite d'élasticité du matériau.

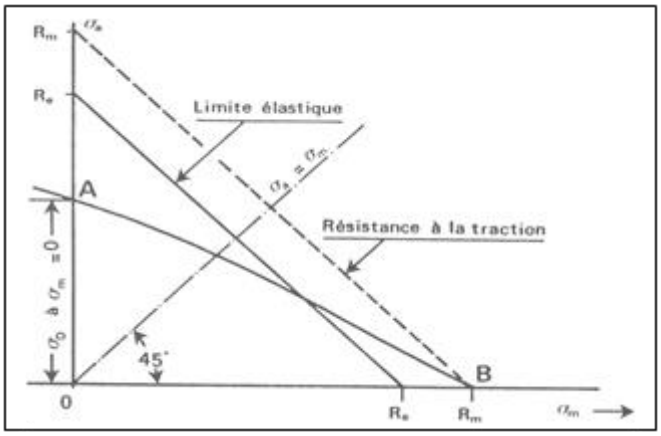


Figure 2.14 Diagramme de Haigh[11]

Plusieurs représentations de la courbe AB ont été proposées et qui permettent de construire un diagramme d'endurance approché, lorsqu'on ne connaît que la limite d'endurance en sollicitation purement alternée et les caractéristiques mécaniques statistiques (Re, Rm) du matériau.

-

- ✓ Droite de Goodman : σa = σD (1-$\frac{\sigma m}{Rm}$)
- ✓ DroitedeSöderberg::σa = σD (1- σm/Re)