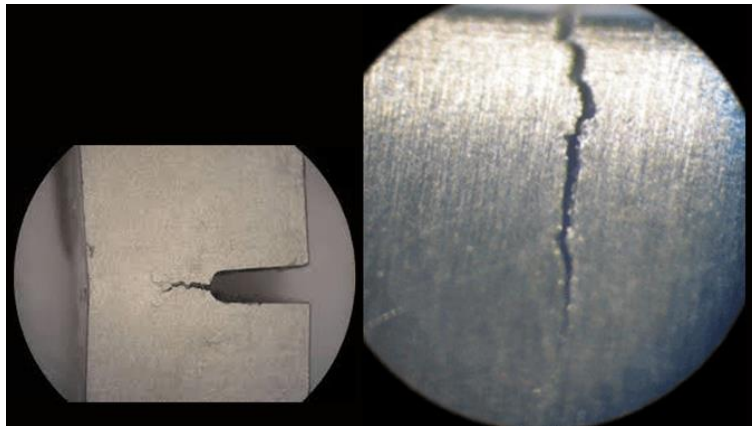


Mécanique de la rupture et endommagements

Chapitre 1

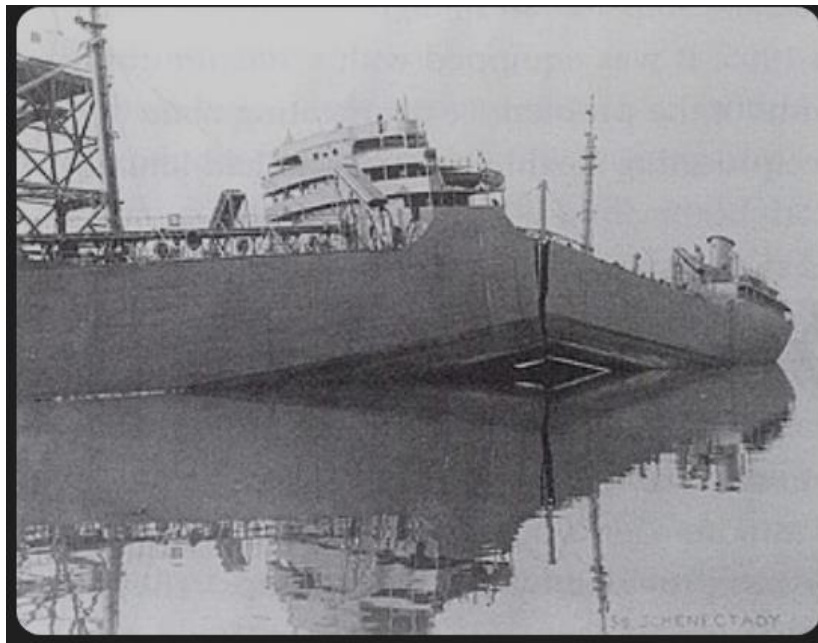




La catastrophe s'explique par la rupture de la dérive de l'appareil.



Corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable



Rupture fragile

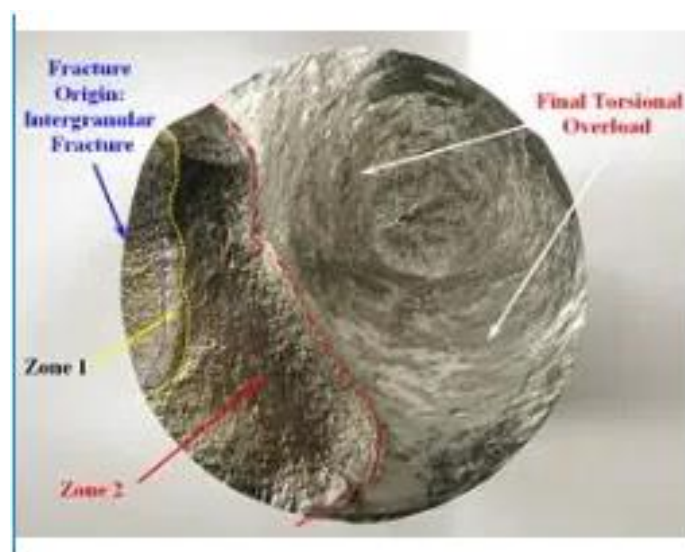


*Avez-vous déjà été confronté à une défaillance soudaine d'une pompe due à la rupture d'un arbre ? **Il ne s'agit pas seulement de la panne immédiate, mais aussi des retards de production, des coûts imprévus et du stress lié à la recherche de solutions rapides.***

Lorsqu'un arbre de pompe se casse, des lignes de production entières peuvent s'arrêter, ce qui a des répercussions sur l'ensemble de vos activités.



Rupture de fatigue d'un arbre de transmission de voiture de course rompu en fatigue sous sollicitations de torsion.



***LES FISSURES PEUVENT SE PROPAGER
ET CASSER LES PIÈCES, NOTAMMENT
MÉTALLIQUES.***

***PARCE QU'ELLES PEUVENT AVOIR DE
GRAVES CONSÉQUENCES, IL EST
IMPORTANT DE COMPRENDRE COMMENT
CES FISSURES SE FORMENT ET
ÉVOLUENT.***

Chapitre 1 : Introduction à la Mécanique de la rupture et fatigue

1.1 Définition et généralité

L'endommagement et la rupture de pièces sont des problématiques rencontrées dans les applications subissant des sollicitations sévères (hautes fréquences, grandes déformations, échauffement, environnement...). **La bonne connaissance de ces paramètres et leurs conséquences permettent de prédire les comportements du matériau de façon instantanée ou à long terme, et de déterminer la durée de vie du produit, les efforts admissibles..** Plus généralement, un endommagement est susceptible de diminuer la résistance d'un matériau dans d'autres directions que celle de la sollicitation.

L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. La mécanique de la rupture tend à définir une propriété du matériau qui peut se traduire par sa résistance à la rupture fragile (fracture). Car si, en règle générale, les structures sont calculées pour que les contraintes nominales ne dépassent pas la limite d'élasticité du matériau et soient donc, par voie de conséquence, à l'abri de la ruine par rupture de type ductile, une ruine par rupture de type fragile peut survenir sur une fissure soit préexistante soit créée par la fatigue.

1.2 Effets de contraintes

Jusqu'au début du vingtième siècle il était considéré que **la résistance à la rupture des matériaux dépendait de valeurs extrêmes de certaines composantes de la contrainte**. On parlait ainsi de résistance en traction ou de résistance en compression. En 1920, le travail de Griffith sur le développement de la rupture dans les matériaux métalliques, a montré que dans tous les matériaux, y compris les verres, **il existe des défauts plus ou moins petits qui impliquent des concentrations locales de contrainte**. Ainsi les valeurs moyennes de contrainte, calculées en tout point d'un matériau en supposant que le matériau est homogène (sans défauts) et au repos (vitesse nulle en tout point), ne permettent pas d'évaluer les conditions de chargement qui engendrent la rupture de ce matériau. On doit s'intéresser à la croissance des défauts et plus particulièrement aux concentrations de contrainte qui leur sont associées.

Aujourd'hui l'étude d'un phénomène de rupture doit répondre à trois questions:

- Quelles sont les conditions de chargement qui entraînent la propagation de défauts ?
- Quelle est la géométrie des surfaces engendrées par la propagation de ces défauts ?
- Le processus de rupture est-il stable ou instable ?

UNE DÉFAILLANCE MÉCANIQUE EST BIEN SOUVENT LE RÉSULTAT D'UNE FATIGUE.

1.3 Failure de la fatigue

Il est bien connu que le métal peut être rompu à force de répéter des mouvements de pliage de grande amplitude en va-et-vient.

Définition

La fatigue est un mode de rupture des matériaux causé par l'application répétée ou cyclique de charges, généralement inférieures à la résistance statique du matériau. Elle se produit même sans surcharge apparente, après un grand nombre de cycles.

Le processus de rupture par fatigue se déroule en trois phases principales :

1. Initiation de fissure

Apparition de microfissures à des zones de concentration de contraintes (soudures, coins vifs, défauts de surface...), souvent au niveau de la surface, où les contraintes sont maximales.

2. Propagation de fissure

Sous l'effet des cycles de charge, la fissure s'étend progressivement. Cette phase est souvent la plus longue. Elle peut être décrite par la loi de Paris.

3. Rupture brutale

Lorsque la fissure atteint une taille critique, le matériau ne peut plus supporter la contrainte restante ce qui provoque une rupture soudaine.

La durée de vie en fatigue est exprimée par la limite de fatigue ou (endurance limite): **contrainte maximale sous laquelle un matériau peut résister à un nombre infini de cycles sans rupture**. Si la contrainte cyclique est supérieure à cette limite, la rupture se produit après un certain nombre de cycles à la rupture (N_f). La Courbe S-N de Wöhler, représente la relation entre la contrainte alternée (S) et le nombre de cycles à la rupture (N). Elle est utilisée pour prévoir la durée de vie en fatigue des pièces.

La courbe typique de Wöhler montre une pente descendante, puis un palier montrant la limite de fatigue pour les matériaux.

Généralement, les facteurs influençant la fatigue peuvent être les suivants :

- Géométrie (concentrations de contraintes)
- État de surface (rugosité, usinage)
- Environnement (corrosion, température)
- Traitements thermiques ou de surface
- Type de sollicitation (traction, flexion, torsion)

La fatigue est un mode de rupture insidieux car elle se produit sous des charges modérées et après un grand nombre de cycles. Sa prévention passe par une bonne conception mécanique (éviter les concentrations de contraintes), le choix du matériau adapté et des traitements pour améliorer la résistance à la fatigue.

1.4 Facteurs affectant la durée de vie de la fatigue

De nombreux facteurs influencent la résistance à la fatigue des matériaux. Les facteurs externes comprennent la forme et la taille de la pièce, l'état de surface et les conditions d'utilisation. Les facteurs intrinsèques comprennent la composition du matériau, la structure, pureté, les contraintes résiduelles De subtils changements dans ces facteurs peuvent provoquer des fluctuations, voire des changements importants, dans les propriétés de fatigue des matériaux. L'influence de divers facteurs sur la résistance à la fatigue est un aspect important de la recherche sur la fatigue. Ces recherches serviront de base à une conception structurelle rationnelle des pièces, ainsi qu'à une sélection judicieuse des matériaux et à la formulation rationnelle de divers procédés de traitement à froid et à chaud afin de garantir aux pièces une résistance élevée à la fatigue.

a. L'effet de la concentration de contraintes sur les matériaux

La résistance à la fatigue conventionnelle est mesurée sur des éprouvettes lisses soigneusement usinées. Cependant, les pièces mécaniques réelles présentent inévitablement différentes formes d'entailles, telles que des gradins, des rainures de clavette, des filetages et des trous de graissage. La présence de ces entailles entraîne une concentration de contraintes, de sorte que la contrainte réelle maximale au fond de l'entaille est bien supérieure à la contrainte nominale de la pièce, et la rupture par fatigue commence souvent à partir de là.

Le facteur de concentration de contrainte théorique K_t qui est le rapport entre la contrainte réelle maximale et la contrainte nominale au fond de l'entaille est obtenu à partir de la théorie élastique dans des conditions élastiques idéales.

Le facteur de concentration de contrainte effective (ou facteur de concentration de contrainte de fatigue) **K_f** est :

le rapport de la limite de fatigue de l'échantillon lisse à la limite de fatigue de l'échantillon entaillé.

Le facteur de concentration de contrainte efficace n'est pas seulement affecté par la taille et la forme du composant, mais également par les propriétés physiques du matériau, le traitement thermique et d'autres facteurs. En raison de l'inhomogénéité du matériau lui-même et de l'existence de défauts internes, nous assistons à une augmentation de la probabilité de défaillance du matériau, réduisant ainsi la limite de fatigue du matériau.

L'existence de l'effet secondaire est un problème important dans l'application des données de fatigue mesurées sur de petits échantillons en laboratoire aux pièces réelles de grande taille. Ce qui entraîne **une déconnexion entre les résultats de laboratoire et la rupture par fatigue de certaines pièces spécifiques**.

b. Influence de l'état d'usinage de surface des pièces sur la résistance à la fatigue de l'aluminium

La surface usinée présente toujours des marques d'usinage irrégulières. Ces marques, équivalentes à de minuscules interstices, entraînent une concentration de contraintes à la surface du matériau, réduisant ainsi sa résistance à la fatigue. Des essais ont montré que, pour l'acier et les alliages d'aluminium, l'ébauche (tournage) réduit la limite de fatigue de 10 à 20 %, voire plus, par rapport à la finition longitudinale.

c. Influence du chargement du matériau sur la résistance à la fatigue

Aucune pièce ne fonctionne sous une contrainte d'amplitude absolument constante. La surcharge et les charges secondaires lors du travail réel du matériau affectent sa limite de fatigue. L'expérience montre que le matériau présente généralement des dommages dus à la surcharge et à des charges secondaires.

L'endommagement par surcharge est le résultat de la diminution de la limite de fatigue d'un matériau après qu'il a été soumis à une charge supérieure à cette limite pendant un certain nombre de cycles. Plus la surcharge est élevée, plus le nombre de cycles nécessaires pour provoquer un dommage est court.

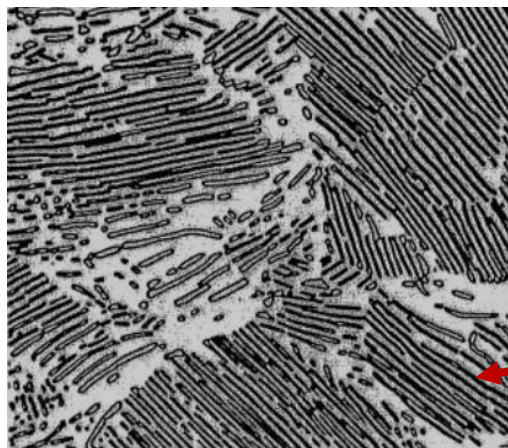
d. Effet de la composition chimique sur la résistance à la fatigue des matériaux métalliques

Dans certaines conditions, la résistance à la fatigue du matériau est étroitement liée à sa résistance à la traction. Par conséquent, tout élément d'alliage améliorant la résistance à la traction peut également améliorer la résistance à la

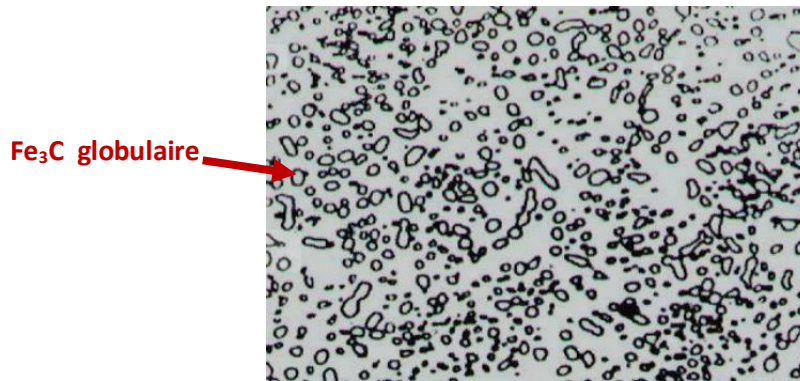
fatigue du matériau. En revanche, le carbone est un facteur important affectant la résistance du matériau. Cependant, certaines impuretés qui forment des inclusions dans l'acier ont un effet néfaste sur la résistance à la fatigue.

e. Effets du traitement thermique et de la microstructure sur la résistance à la fatigue des matériaux

Différents traitement thermique donneront lieu à des microstructures différentes. Par conséquent, l'effet du traitement thermique sur la résistance à la fatigue est essentiellement lié à la microstructure. Des matériaux de même composition, grâce à différents traitements thermiques, peuvent avoir des structures différentes, la résistance à la fatigue peut donc varier considérablement. À résistance égale, la résistance à la fatigue de la perlite lamellaire est nettement inférieure à celle de la perlite globulaire la figure ci-dessous montre une structure perlitique avec une cémentite lamellaire et sphéroïdale. De même, plus les particules de cémentite sont fines, plus la résistance à la fatigue de la perlite globulaire est élevée. L'influence de la microstructure sur les propriétés de fatigue des matériaux n'est pas seulement liée aux propriétés mécaniques des différentes structures, mais aussi à la morphologie et à la répartition des composants structuraux. L'affinement des grains augmente la résistance à la fatigue du matériau.



Fe₃C lamellaire



Structure perlitique avec une cémentite lamellaire et sphéroïdale.

f. Influence des inclusions sur la résistance à la fatigue des matériaux

Il est généralement admis que l'inclusion est à l'origine de la rupture par fatigue de l'acier. Les inclusions elles-mêmes ou les trous qu'elles génèrent sont équivalents à de minuscules espaces et, sous l'action de charges alternées, une concentration de contraintes et une concentration de déformation se produiront, ce qui deviendra la source de fissures de fatigue, ce qui affectera négativement les performances de fatigue du matériau. L'influence des inclusions sur la résistance à la fatigue dépend non seulement du type, de la nature, de la forme, de la taille, de la quantité et de la répartition des inclusions, mais également du niveau de résistance du matériau et du niveau et de l'état de la contrainte appliquée.

NATURE	Nitride de titane Chromite Aluminates isolés	Oxydes de fer et de manganèse Silice Aluminates de calcium	Sulfures de fer et de manganèse	Silicates basiques	Silico-aluminates
MALLÉABILITÉ	Non malléables	Très peu malléables	Très malléables	Malléables	Non malléables
FORME					
COULEUR	En fond clair En fond noir	Sombres sauf nitrures de titane : jaune-rosés	Sombres	Clairs	Sombres
		Oxydes sombres silice brillante	Sulfures sombres	Silicates ± brillants	Sombres

Différents types d'inclusions

Les différents types d'inclusions présentent des propriétés mécaniques et physiques différentes et ont des effets différents sur les propriétés de fatigue. En général, les inclusions plastiques facilement déformables (comme les sulfures) ont peu d'effet sur les propriétés de fatigue de l'acier, tandis que les inclusions cassantes (comme les oxydes, les silicates, etc.) sont plus néfastes.

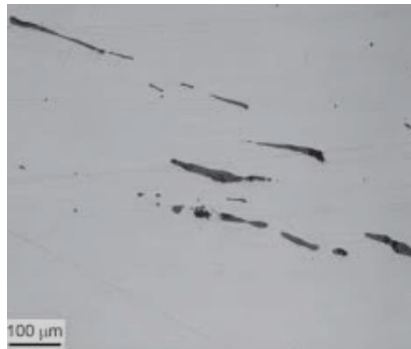
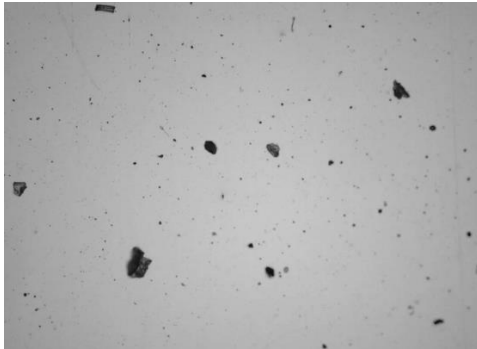
Les inclusions avec un coefficient de dilatation plus grand que la matrice (comme le sulfure) ont peu d'influence en raison de la contrainte de compression dans la matrice, tandis que les inclusions avec un coefficient de dilatation plus petit que la matrice (comme l'alumine, etc.) ont une plus grande influence en raison de la contrainte de traction dans la matrice.

La force de liaison des inclusions au métal de base affecte également la résistance à la fatigue. Le sulfure est facilement déformable et se lie étroitement au métal de base, tandis que l'oxyde se détache facilement du métal de base, ce qui entraîne une concentration de contraintes. Le type d'inclusions montre que l'influence des sulfures est faible, tandis que celle des oxydes, nitrures et silicates est plus néfaste.

Sous différentes conditions de chargement, les effets des inclusions sur les propriétés de fatigue des matériaux varient également. Sous forte charge, avec ou sans inclusions, la charge appliquée est suffisante pour induire une rhéologie plastique du matériau, et l'influence des inclusions est faible.

Dans la plage de contrainte limite de fatigue du matériau, la présence d'inclusions fait de la concentration locale de contrainte le facteur déterminant de la déformation plastique, ce qui affecte fortement la résistance à la fatigue du matériau. Autrement dit, la présence d'inclusions affecte principalement la limite de fatigue du matériau et a peu d'effet sur sa résistance à la fatigue dans des conditions de contraintes élevées.

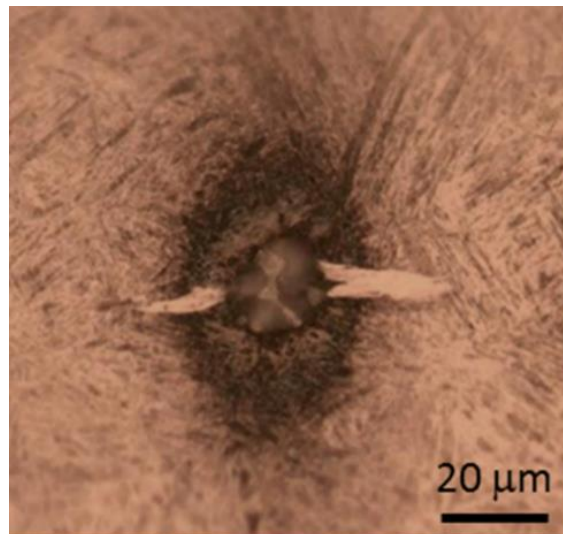
La pureté du matériau est déterminée par le procédé de fusion. Par conséquent, le recours à des méthodes de fusion purificatrice (telles que la fusion sous vide, le dégazage sous vide et la refusion sous laitier électrolytique, etc.) permet de réduire efficacement la teneur en impuretés de l'acier et d'améliorer sa résistance à la fatigue.

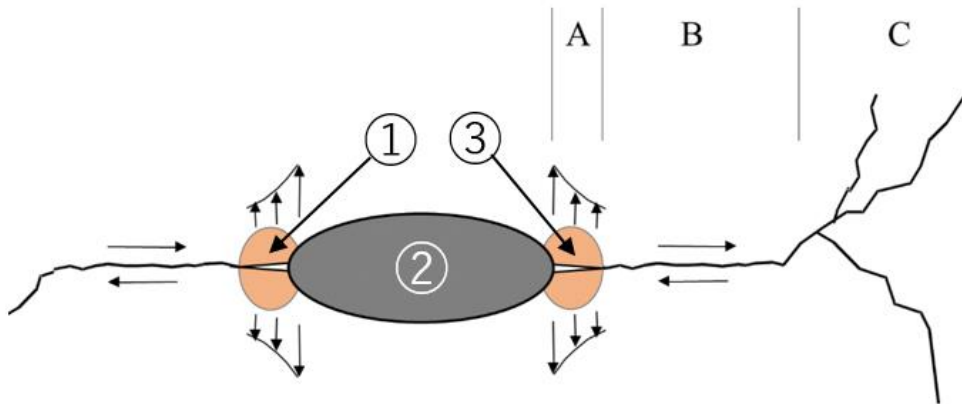


Inclusions présents dans le matériau

Exemple

Effets des imperfections préexistantes du matériau sur les performances des roulements.



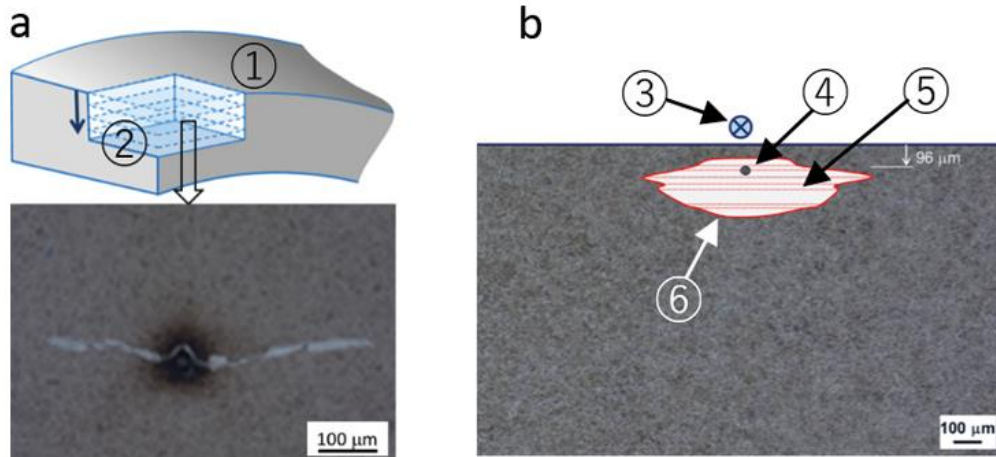


Les trois étapes du développement du dommage par FCR à partir d'une inclusion en sous-couche :

- A. Déclenchement et développement de la fissuration sous l'effet de la contrainte locale à proximité d'une inclusion ;
- B. Propagation de la fissure sous l'effet de la contrainte de cisaillement alternée au passage d'éléments roulants ;
- C. Ramification de la fissure conduisant à un écaillage.

① Zone plastique ② Inclusion ③ Zone plastique

Fissuration associée à des inclusions



- ① Piste
- ② Plans de section
- ③ Direction du passage des éléments roulants
- ④ Inclusion
- ⑤ Plan de section latéral
- ⑥ Front de la fissure

g. Effet des changements de propriétés de surface et des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue des matériaux

L'influence de l'état de surface inclut également les modifications des propriétés mécaniques de la couche superficielle et l'influence des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue. La modification des propriétés mécaniques de la couche superficielle peut être due à une différence de composition chimique et de structure, ou à sa déformation et à son renforcement.

En plus d'augmenter la résistance à l'usure des pièces, les traitements thermiques de surface tels que la cémentation, la nitruration et la carbonitruration sont également un moyen efficace d'améliorer la résistance à la fatigue des pièces, en particulier la fatigue par corrosion et le grippage.

Si l'élément carbone est éliminé pendant le processus de traitement thermique, la résistance de surface de la pièce sera réduite et la résistance à la fatigue du matériau sera également considérablement réduite.

La trempe par induction, est utilisée pour créer une certaine profondeur de couche de dureté élevée de la surface favorisant la formation d'une contrainte de compression résiduelle sur la couche de surface. C'est donc également une méthode efficace pour améliorer la résistance à la fatigue des pièces.

Dans de nombreux cas, la contrainte résiduelle peut être considérée comme identique aux contraintes produites par une force externe. Ainsi, la présence d'une contrainte résiduelle de compression à la surface d'une pièce, réduit efficacement la probabilité d'une rupture liée à la fatigue.

D'un point de vue global, les traitements de surface sont divisés en traitements mécaniques, thermiques et de métallisation. Les deux premiers processus fournissent une couche de compression, tandis que le processus de métallisation fournit une contrainte résiduelle de traction. Vous trouverez ci-après la description détaillée de chaque processus :

Traitements mécaniques :

Les principales méthodes commerciales d'introduction de contraintes de compression résiduelles sont le laminage à froid et le grenaillage. Même si une certaine altération de la résistance du matériau a lieu en raison de l'écrouissage, l'amélioration de la résistance en fatigue est principalement due à la contrainte de compression à la surface.

Le grenaillage, qui consiste à projeter des billes d'acier fin ou de la fonte sur la surface d'une pièce

Traitements thermiques :

Les traitements thermiques sont des processus basés sur la diffusion de carbone (carburation) ou d'azote (nitration) sur et dans la surface d'une composante en acier. Ces deux types d'atomes sont interstitiels, c.-à-d. qu'ils occupent les espaces entre les atomes de fer adjacents et augmentent donc la résistance de l'acier et sont la cause d'une contrainte résiduelle de compression laissée sur la surface par des changements volumétriques.

L'efficacité du processus est illustrée dans le tableau suivant :

Limite d'endurance (MPa)	
Non nitruré	Nitruré
310	620
175	600
175	550

Métallisation :

La métallisation au chrome et au nickel des pièces en acier peut réduire la limite d'endurance de plus de la moitié du fait de la création de contraintes résiduelles de traction à la surface. Ces contraintes de traction sont le résultat direct du processus de métallisation en lui-même.

L'introduction d'une contrainte résiduelle de compression avant le processus de métallisation, comme le grenaillage ou la nitration, peut réduire les effets indésirables de la métallisation. Le recuit des pièces après la métallisation fait diminuer les contraintes de tractions, est une autre approche possible.

Effets quantitatifs des traitements de la surface sur la limite de l'endurance (aciers)

Les effets des traitements de la surface dépendent de l'état de surface. L'augmentation de la contrainte de limite d'endurance due au traitement de la surface est indiquée dans le tableau suivant :

	Augmentation de la limite d'endurance		
Finition	Grenaillé	Laminé à froid	Nitruré
Poli	+15 %	+50 %	+100 %
Usiné	+30 %	+70 %	+100 %
Laminé à chaud	+40 %	+0 %	+100 %
Moulé	+40 %	+0 %	+100 %
Forgé	+100 %	+0 %	+100 %

1.5 Fatigue de cycle élevé

Il a été découvert que des contraintes répétées peuvent engendrer une rupture même si l'amplitude de contrainte se situe apparemment bien dans la plage d'élasticité du matériau. Lorsque les problèmes de ruptures liées à la fatigue des essieux de chemin de fer se sont généralisés au milieu du XIXe siècle, l'attention a été portée sur les effets des charges cycliques. C'était la première fois qu'un grand nombre de pièces étaient soumises à des millions de cycles à des niveaux de contrainte bien inférieurs à leur limite élastique de traction non cycliques. Entre 1852 et 1870, August Wöhler, ingénieur allemand de chemins de fer, a mis en place et dirigé la première investigation sur la fatigue systématique.

Certaines des données d'August Wöhler portent sur l'acier d'essieu Krupp et ont été tracées en termes de contrainte nominale (S) contre le nombre de cycles jusqu'à rupture (N), ce qui constitue ce que l'on appelle désormais le diagramme S-N. Aujourd'hui encore, chaque courbe d'un diagramme de ce type est appelée courbe de Wöhler.

A peu près à la même époque, d'autres ingénieurs ont commencé à s'intéresser aux problèmes des ruptures associées aux charges fluctuantes pour les ponts, les équipements maritimes et les machines de production d'énergie. Au cours de la première partie du XXe siècle, un effort supplémentaire a été fait pour comprendre les mécanismes du processus de fatigue plutôt que de se contenter d'en observer les résultats. Ces activités ont finalement conduit, à la fin des années cinquante-début des années soixante, au développement de deux approches : l'une basée sur la mécanique élastique linéaire de la rupture (LEFM) expliquant la propagation des fissures et l'autre, appelée méthodologie de déformation locale Coffin-Manson, expliquant le commencement des fissures. Grâce à ces éclaircissements, les ingénieurs et concepteurs modernes ont pu créer des pièces de meilleure résistance en fatigue sans se baser uniquement sur les expérimentations. D'un point de vue pratique, cette approche est beaucoup plus rentable.

1.6 Termes de contraintes

La mécanique de la rupture étudie la manière dont les matériaux se fissurent et se rompent sous l'effet de contraintes mécaniques, notamment lorsque des défauts (fissures, entailles, inclusions, ...) sont présents.

Un matériau rompt lorsqu'il ne peut plus supporter les contraintes internes dues à une charge appliquée. Cependant, la rupture ne dépend pas uniquement de la contrainte maximale : elle est fortement influencée par la présence de fissures ou défauts. Ces derniers peuvent provoquer une augmentation locale des contraintes. La concentration de contraintes est souvent décrite par le facteur de concentration de contraintes K. Il dépend de la forme (géométrie), de la contrainte appliquée et de la demi-longueur de la fissure.

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

- K : facteur d'intensité des contraintes
- Y : facteur de forme (dépend de la géométrie)
- σ : contrainte appliquée
- a : demi-longueur de la fissure

En termes de contraintes, la mécanique de rupture montre que ce n'est pas la contrainte globale qui cause la rupture, mais la concentration de contrainte locale au

voisinage des fissures. La capacité d'un matériau à résister à cette concentration détermine sa résistance réelle à la rupture.

1.7 Termes de force

1. Notion de contrainte critique (ou force critique)

Un matériau contenant une fissure peut rompre sous une force bien inférieure à la force théorique de rupture du matériau parfait. La contrainte critique est la contrainte (**force par unité de surface**) à partir de laquelle la fissure se propage brutalement.

2. Critère de Griffith (pour les matériaux fragiles)

Pour un matériau élastique avec une fissure de longueur (a), la force nécessaire pour initier la rupture est liée à :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$$

- σ_c : contrainte critique
- E : module d'Young
- γ : énergie de surface (énergie pour créer une nouvelle surface)
- a : demi-longueur de la fissure

Plus la fissure est longue, plus la force nécessaire pour provoquer la rupture est faible

3. Facteur d'intensité de contrainte K

Le facteur K quantifie la concentration des contraintes autour du bout de fissure. Si (K) atteint une valeur critique K_c (ténacité à la rupture), la rupture se produit.

Pour une fissure dans une plaque soumise à une contrainte σ :
Si $K >$ ou égale à K_c , la fissure se propage de façon instable.

4. Applications en termes de force

Dans la conception mécanique, on vérifie que la force appliquée ne génère pas un facteur K supérieur à K_c même en présence de défauts. Cela permet de prédire la rupture plus précisément qu'en ne tenant compte que de la résistance à la traction.

5. Résistance résiduelle

Quand une structure présente une fissure, la force maximale qu'elle peut supporter est réduite, et dépend :

- De la taille de la fissure
- Du matériau (tenacité K_{IC})
- De la géométrie de la structure

1.8 Termes de la déformation

Lorsqu'un matériau est soumis à une déformation, il peut se rompre de manière fragile ou ductile, selon sa nature et condition de chargement.

- Déformation élastique : réversible, le matériau reprend sa forme initiale après l'arrêt de la charge.
- Déformation plastique : irréversible, le matériau subit une modification permanente de sa forme.
- Localisation de la déformation : avant la rupture, la déformation peut se concentrer dans une zone étroite (zone de striction ou fissuration).

Type de rupture	Déformation associée	Caractéristiques
Rupture fragile	Faible déformation	Peu ou pas de déformation plastique, rupture brutale, souvent à basse température.
Rupture ductile	Grande déformation	Déformation plastique importante avant rupture, absorption d'énergie.
Rupture mixte	Moyenne déformation	Comportement intermédiaire, fréquent dans les matériaux métalliques.

1.9 Relations contrainte-déformation

La mécanique de la rupture étudie le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des charges entraînant leur endommagement ou leur fracture. L'analyse repose en grande partie sur la relation entre contrainte et déformation, qui permet de caractériser la résistance et la ductilité d'un matériau.

1. Phase élastique (comportement réversible)

Loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

où :

- σ : contrainte (Pa)
- ε : déformation (sans unité)
- E : module de Young (Pa)

Dans cette zone, le matériau revient à sa forme initiale après déchargement.

2. Phase plastique (déformations permanentes)

Une fois la limite d'élasticité dépassée, le matériau se déforme de façon plastique.

La relation contrainte-déformation n'est plus linéaire. On observe un écrouissage : le matériau devient plus résistant à mesure qu'il se déforme.

3. Rupture (fragile ou ductile)

a. Rupture ductile

Le matériau subit de grandes déformations avant la rupture. La courbe contrainte-déformation présente un maximum (contrainte ultime), une chute (striction) et une rupture finale

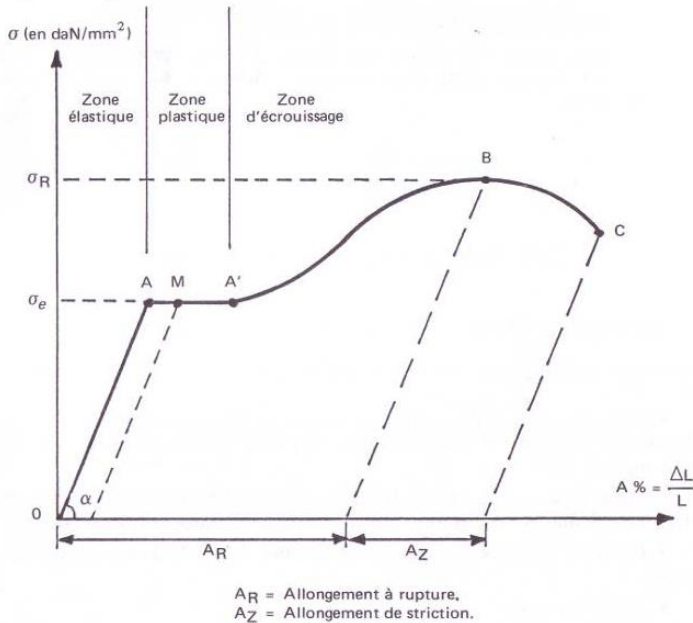
b. Rupture fragile

Elle se produit sans déformation plastique notable. La rupture est soudaine, généralement à des contraintes inférieures à la limite élastique. Typique des matériaux comme la céramique ou certains aciers à basse température.

4. Exemple de courbe contrainte-déformation typique :

Nous examinons ici la courbe de l'essai de traction.

On sollicite une éprouvette en traction uni-axiale jusqu'à la rupture pour déterminer ses caractéristiques mécaniques. On obtient un diagramme effort-déformation.



- OA: zone rectiligne pour laquelle il y a proportionnalité entre la déformation et l'effort appliqué. C'est une zone élastique réversible
- AA': palier horizontal, traduisant un allongement sous charge constante. Il y a écoulement du matériau, c'est la zone plastique.
- A'B: la charge croît de nouveau avec les allongements jusqu'au point B. si l'on décharge l'éprouvette dans la zone plastique A'B on constate un allongement rémanent; si on la recharge, on constate un comportement élastique jusqu'à la charge précédente: on a augmenté la limite d'élasticité, le métal a été écroui.
- BC: l'allongement continue, bien que la charge soit décroissante, jusqu'au point C où il y a rupture. Dans cette phase il y a striction: la déformation plastique est localisée dans une faible portion de l'éprouvette et n'est donc plus homogène.

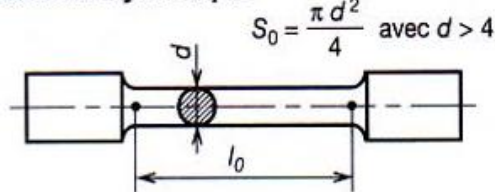
On mesure ainsi:

- Re limite d'élasticité, point A. conventionnellement cette limite élastique est définie comme la contrainte correspondant à un allongement rémanent de 0.2%.
- Rm résistance à la traction, point B
- E module d'élasticité longitudinale de l'acier (pente de OA)
- G module d'élasticité transversale
- Ar% allongement à la rupture, correspondant à la déformation mesurée entre l'état initial et l'état final de rupture
- n coefficient de poisson

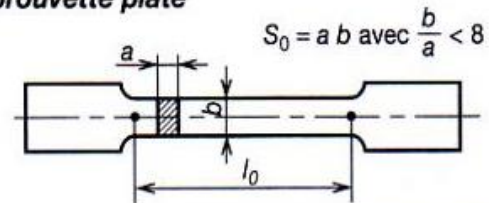
Le palier de ductilité AA' représente une réserve de sécurité, grâce au phénomène d'adaptation plastique: si une pièce est sollicitée au delà de la limite élastique, elle dispose de ce palier pour se décharger dans les zones avoisinantes. Plus la teneur en carbone augmente, et plus le palier de ductilité se raccourcit et plus l'allongement à la rupture diminue, diminuant ainsi la sécurité, car les pièces risquent de périr par rupture brutale, sans aucun signe prémonitoire (grandes déformations).

Eprouvettes normalisées:

Éprouvette cylindrique



Éprouvette plate



Une partie calibrée de longueur l_0 (mm) et de section S_0 (mm) est définie entre deux têtes d'amarrage.

$$l_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$$

1.10 Analogie des fissures

L'analogie des fissures permet de modéliser le comportement d'une fissure dans un matériau, en utilisant des représentations équivalentes (mécaniques ou mathématiques). Ces analogies facilitent la compréhension des phénomènes complexes de rupture.

1. Modèle de Griffith (1920)

L'un des premiers modèles pour expliquer la rupture fragile.

Hypothèse : Une fissure préexistante dans un solide diminue son énergie potentielle.

Il y a un équilibre rupture / énergie :

$$G = \frac{dU}{da} \geq G_c$$

- G : Taux de restitution d'énergie.
- G_c : Ténacité du matériau (énergie critique).

Analogie : Une fissure est vue comme une "source" de relaxation d'énergie.

2. Analogie mécanique : ressorts ou circuits

On peut comparer le comportement d'une fissure à un système de ressorts ou à un circuit électrique: La zone fissurée provoque une discontinuité qui implique une perte de raideur. La zone intacte implique un matériau élastique continu.

Exemple : Un ressort avec une coupure (fissure) ne transmet plus l'effort car l'énergie est redistribuée autour de la fissure.

3. Fissures et champs de contraintes

Une fissure perturbe les champs de contraintes dans un matériau. L'analogie est souvent faite avec un champ perturbé autour d'un défaut :

En 2D : une fissure \rightarrow concentration de contraintes \rightarrow facteur d'intensité des contraintes (K).

4. Analogie électrique (parfois utilisée)

Conduction électrique dans un réseau \rightarrow l'interruption (fissure) modifie la distribution du courant. Cette analogie aide à visualiser la redistribution des contraintes dans un matériau fissuré.

Applications

- Prédiction de la propagation des fissures dans les matériaux.
- Calcul du facteur d'intensité de contrainte (K_I), (K_{II}), (K_{III}).
- Utilisé dans les domaines : aéronautique, génie civil, nucléaire, etc.

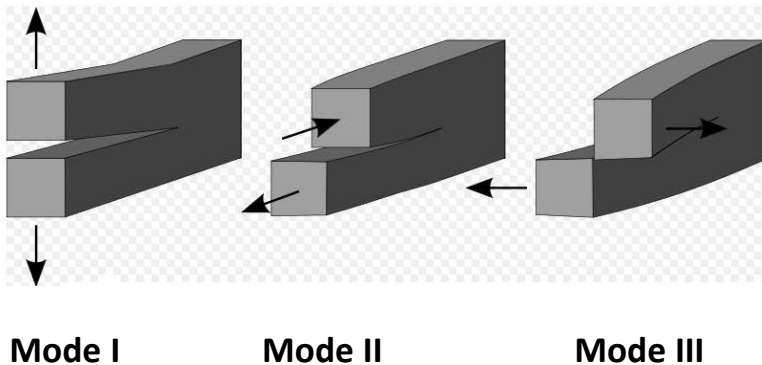
Il est à retenir que les analogies des fissures permettent de mieux comprendre leur effet mécanique, leur interaction avec les contraintes, et leur propagation.

L'approche énergétique (Griffith) et l'approche mécanique (facteurs d'intensité, modélisations analogiques) sont complémentaires.

1.11 Modes de rupture

A la fin des années cinquante, le métallurgiste Irwin a proposé de considérer la propagation de n'importe quel défaut comme la superposition de trois modes fondamentaux de rupture.

Trois modes de rupture principaux sont considérés



Mode I (ouverture) : Un déplacement uniquement suivant l'axe oz correspond à un problème plan particulier désigné par le mode I. Il correspond à une propagation en traction pure. Ce mode est, le plus souvent, le plus dangereux.

Mode II. (glissement dans le plan) : Il est engendré par un cisaillement dans le plan de la fissure et parallèle à l'axe ox . Le mode II correspond à une propagation en cisaillement dans le plan.

Mode III Il est produit par un cisaillement situé dans le plan de la fissure oxy et parallèle à l'axe oy . Il correspond à une propagation en cisaillement.