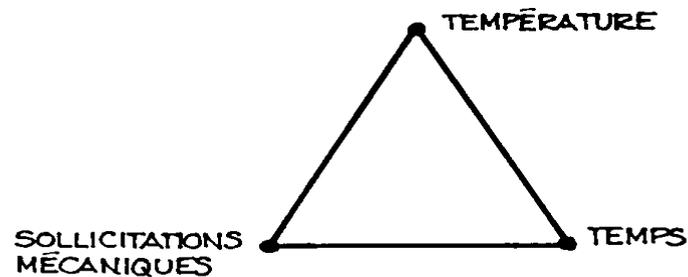


Chapitre 7 : Propriétés mécaniques

Plan

- 1. Viscoélasticité**
- 2. Viscoplasticité**
- 3. Fluage**
- 4. Relaxation des contraintes**
- 5. Transition ductile/fragile**
- 6. Fatigue**

Jusqu'à présent notre étude du comportement mécanique s'est limitée à des cas simplistes. Il y a cependant d'autres facteurs auxquels il faut tenir compte:



- **VISCOÉLASTICITÉ** } (TEMPS)
- **VISCOPLASTICITÉ** }
- **FLUAGE** (TEMPS, TEMPÉRATURE)
- **TRANSITION DUCTILE - FRAGILE**
(TEMPÉRATURE, $d\varepsilon/dt$)
- **FATIGUE** ($\sigma = \sigma_a \cos \omega t$)

Phénomène de fluage

Plan

Viscoélasticité et viscoplasticité

Fluage

Relaxation des contraintes

Le **fluage**: déformation continue d'un matériau dans le temps soumis à une **contrainte constante** et une **température donnée**.

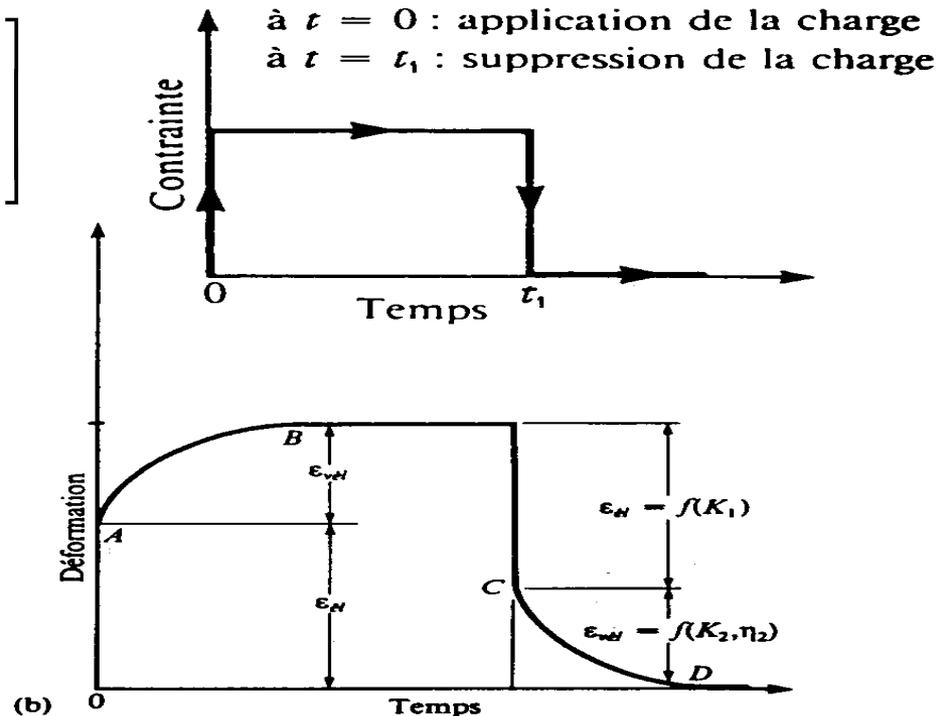
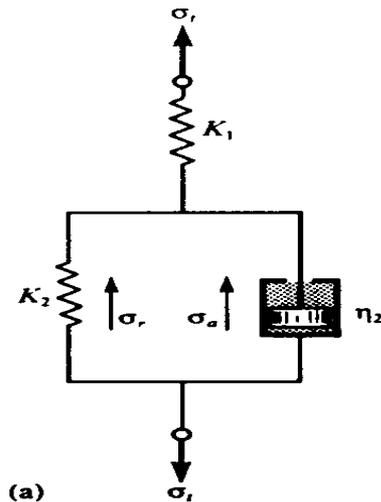
La **réaction élastique** est peu influencée par une augmentation de la vitesse de chargement. Le module de Young conservera sa valeur mais la résistance ultime du matériau peut toutefois augmenter

Le **domaine inélastique** est fortement influencé par le taux de chargement et un matériau ductile peut alors devenir fragile.

comportement viscoélastique

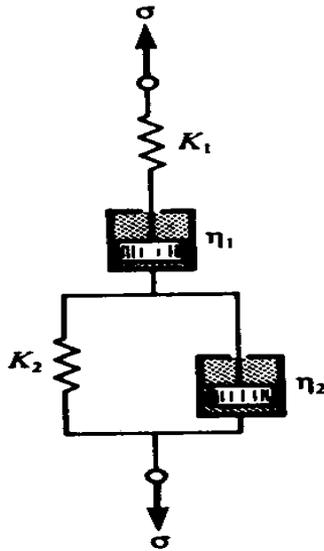
Un matériau est dit avoir un **comportement viscoélastique** lorsqu'il démontre une déformation différée dans le domaine élastique suite à l'application d'une contrainte ponctuelle.

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma_t}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2 t}{\eta_2}\right) \right]$$

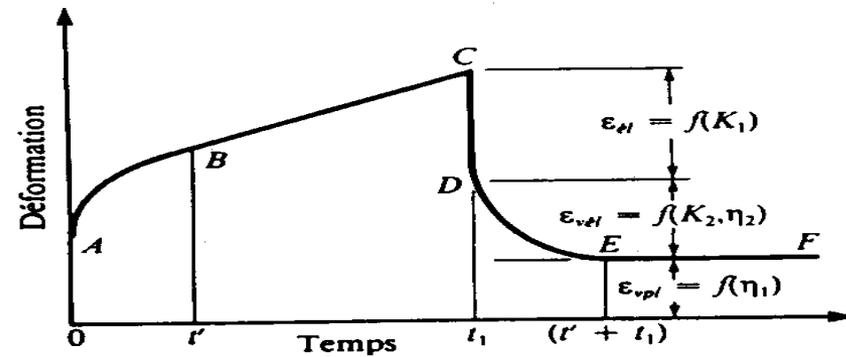
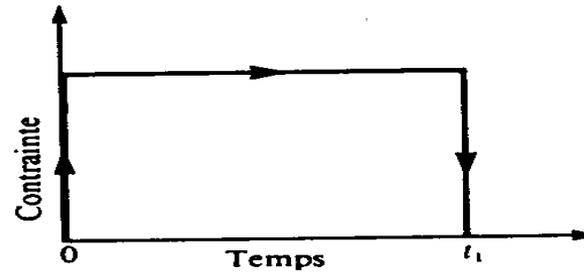


comportement viscoplastique

Si la charge appliquée est supérieure à la limite élastique du matériau, il y a alors **viscoplasticité**. Cette dernière se manifeste dans les matières plastiques et en cas de fluage.

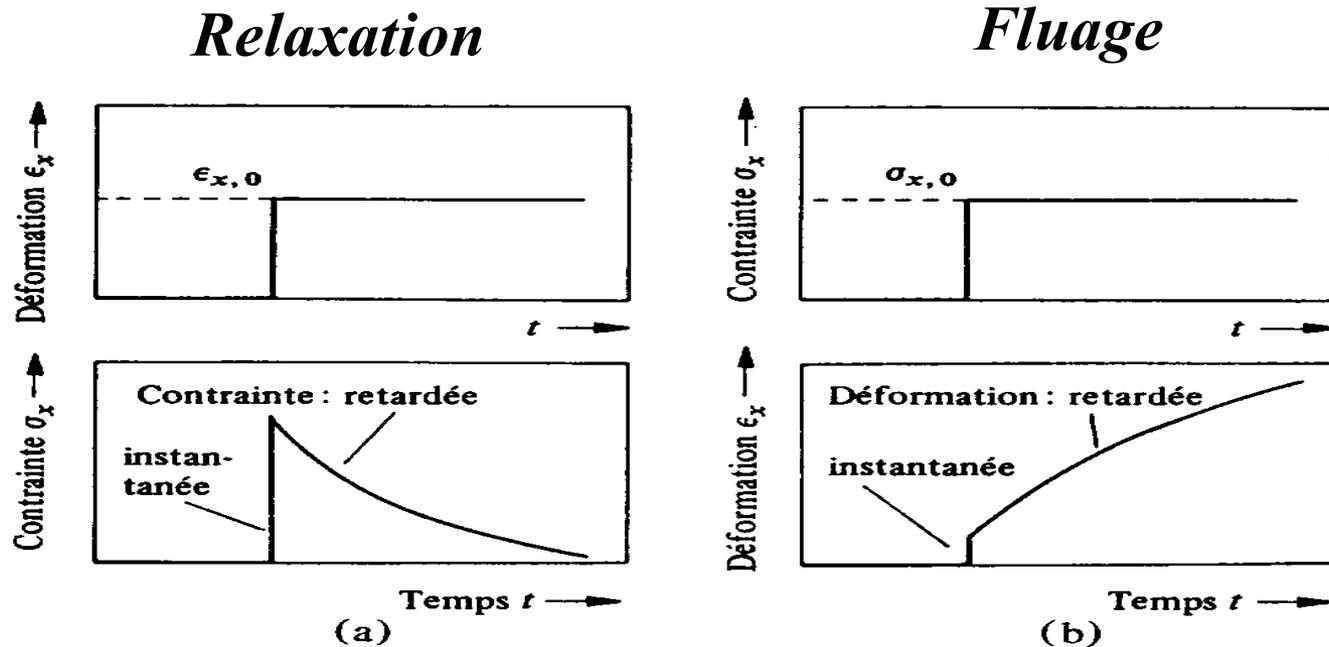


(a)



(b)

La perte de charge sous déformation constante est connue sous le terme de **relaxation**. À l'inverse, le gain de déformation sous charge constante est connue sous le terme de **fluage**.



Tout comme le fluage, la relaxation est une conséquence de la viscoélasticité et de la viscoplasticité des matériaux.

La relaxation est donnée par l'équation suivante:

$$\sigma = \sigma_o \exp(-t/\lambda)$$

où λ est le temps de relaxation (valeur propre au matériau).

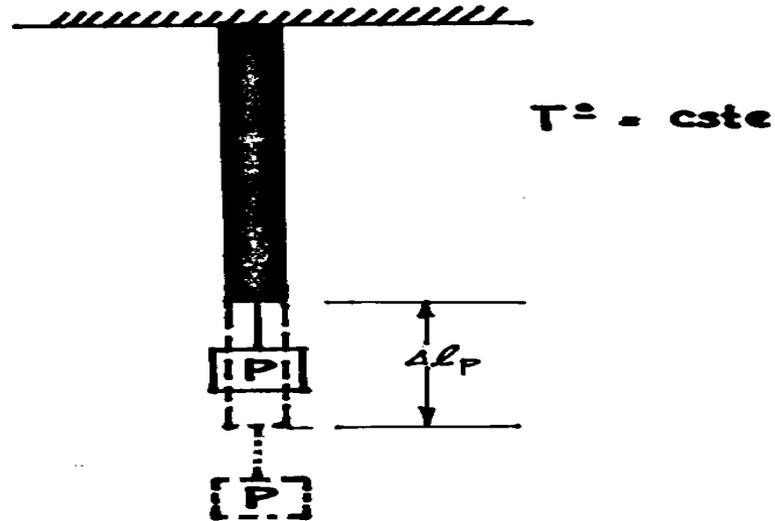
Exercice 1:

Une câble de post-contrainte doit retenir une structure pour une période d'un an. La contrainte dans le câble doit toujours être supérieur à 150 MPa pour agir efficacement. Trouvez la contrainte initiale qui doit être appliquée sachant que le même matériau a affiché une perte de 2 MPa après six semaines alors que la contrainte initiale appliquée était de 100 MPa.

$$\begin{aligned} 98 &= 100 \exp(-6/\lambda) \\ -\frac{6}{\lambda} &= \ln\left(\frac{98}{100}\right) \\ \lambda &= 297 \text{ semaines} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 150 &= \sigma_o \exp(-52/297) \\ \sigma_o &= 178,8 \text{ MPa} \end{aligned}$$

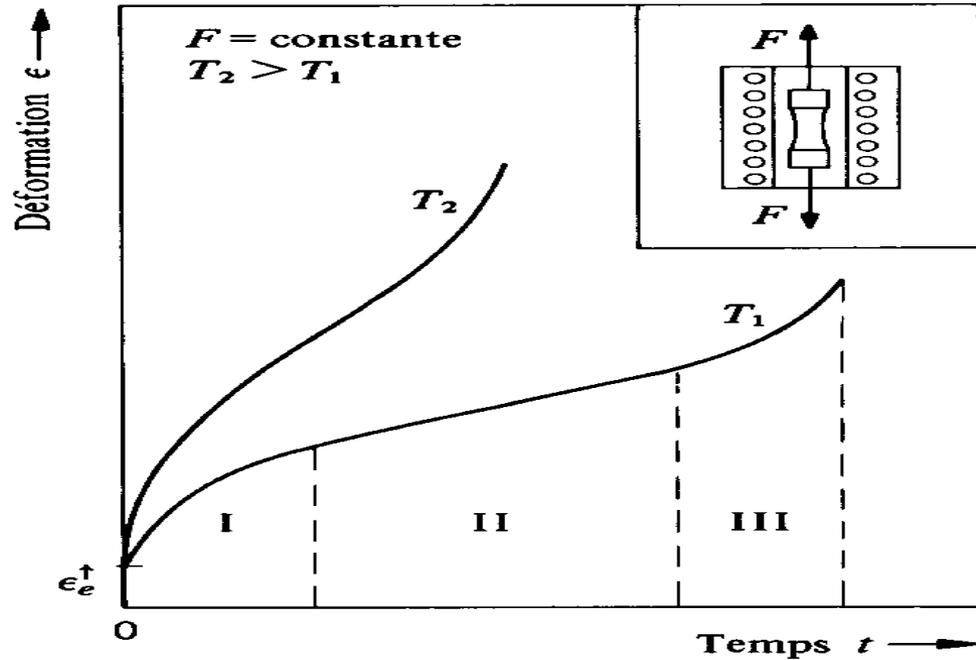
Sous forme mathématique, le fluage est un phénomène plus complexe puisque la courbe de fluage peut avoir jusqu'à trois stades suivant le matériau impliqué.



LE FLUAGE

$$\left[\varepsilon = f(t) \right] \begin{matrix} T = \text{cste} \\ \sigma = \text{cste} \end{matrix}$$

Courbe de fluage des métaux et de leurs alliages



- I Fluage primaire** : ralentissement de la vitesse de fluage par durcissement par écrouissage
- II Fluage secondaire** : durcissement compensé par l'effet de la restauration (diffusion)
- III Fluage tertiaire** : diminution importante de la section résistante par la formation de pores et par striction

a) Fluage Primaire (1^{er} stade)

correspond à une décroissance de la vitesse de déformation avec le temps. A basse température et basse contrainte, le fluage primaire est souvent le régime de fluage prédominant.

b) Fluage Secondaire (2^{ème} stade)

ou fluage stationnaire (en fait « en régime stationnaire »).

vitesse de déformation constante : vitesse de déformation minimale et correspond au paramètre de dimensionnement le plus important que l'on puisse tirer de la courbe de fluage:

$$\left(\frac{d\varepsilon_p}{dt} \right)_{II} = B \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

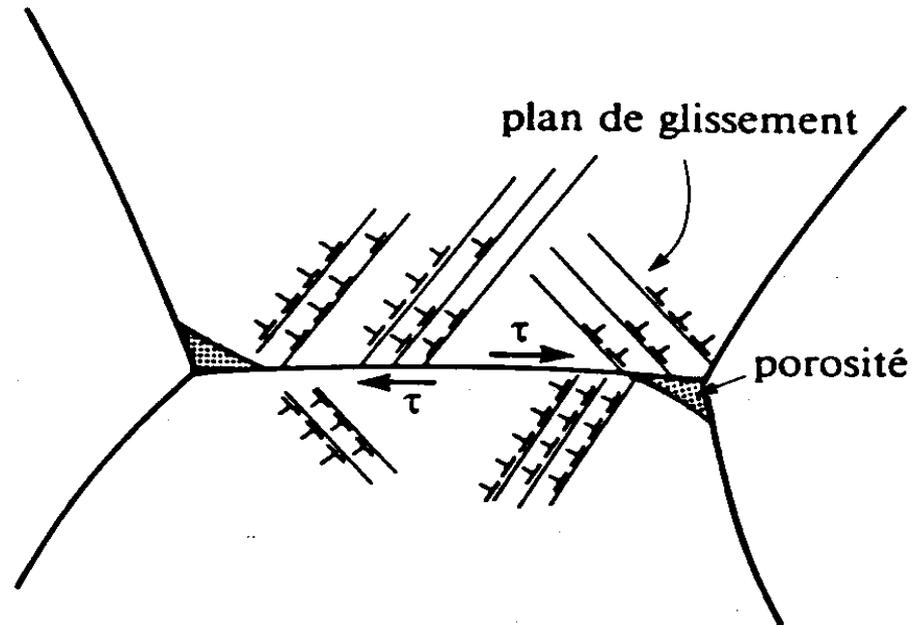
B et n : constantes du matériau
Q : Energie d'activation du mécanisme contrôlant la vitesse de déformation.

N, entre 3 et 8, pour la plupart des métaux purs et alliages courants.

Mécanisme de fluage des métaux

Fluage tertiaire

Rupture intergranulaire par décohéation des joints de grain



Ce troisième stade du fluage est souvent associé à des modifications métallurgiques comme le grossissement des précipités, la recristallisation ...

Fluage des polymères

Le **fluage des polymères** ressemble à celui des métaux à l'exception qu'il se produit à des températures beaucoup plus basses.

Fluage des céramiques

Suivant l'augmentation de la proportion de vides et de phases vitreuses présentes, le **fluage des céramiques** est accentué. Puisque ces matériaux sont à base de liaisons fortes (liaisons ioniques ou covalentes), les dislocations ne se déplacent qu'à des températures élevées.

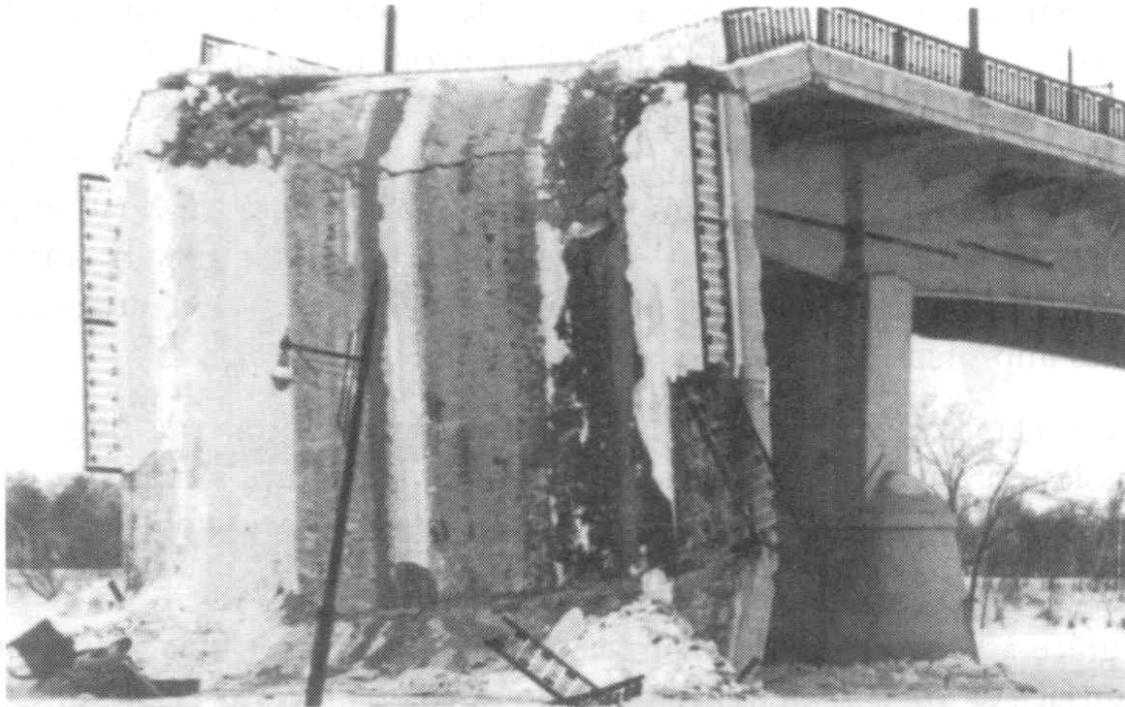
Fluage des céramiques (suite)

Cependant, à température ambiante, une déformation des interfaces et des pores peut se produire sous l'action d'une charge constante. Le fluage en question est alors produit par un tassement du matériau plutôt qu'un mouvement des dislocations.

Ex. béton

Ne pas confondre fluage et tassement !

Transition ductile/fragile

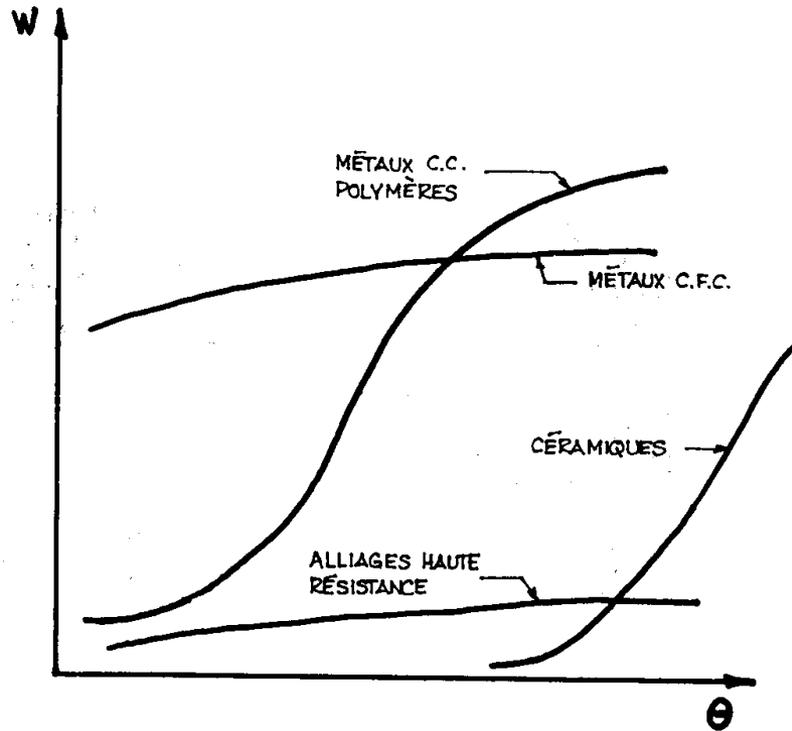


Effet de la température

Un matériau tenace et ductile à température ambiante peut devenir **fragile à basse température** (pensez aux plastiques qui brisent l'hiver !).

La température peut donc influencer la ténacité d'un matériau...

L'essai Charpy permet aussi d'évaluer la variation de la ténacité d'un matériau.



Vitesse de chargement et effet d'entaille constants

TTDF : Température de Transition Ductile Fragile

- **Température diminue \rightarrow $R_{e_{0.2}}$ et R_m augmentent, mais $(R_m - R_{e_{0.2}})$ et $A\%$ décroissent.**
- **Si l'essai a lieu à la TTDF on constate que $(R_m - R_{e_{0.2}})$ et $A\%$ deviennent nuls indiquant un comportement fragile.**

Explications:

- **Quand la température baisse, le mouvement des dislocations devient plus difficile.**
- **À une certaine température, la cisssion nécessaire pour les mettre en mouvement est trop élevée et le matériau brise**

Autres paramètres qui influencent la TTDF

a) Vitesse de sollicitation $d\varepsilon/dt$ ou $d\sigma/dt$

augmentation de la vitesse \rightarrow augmentation de la TTDF

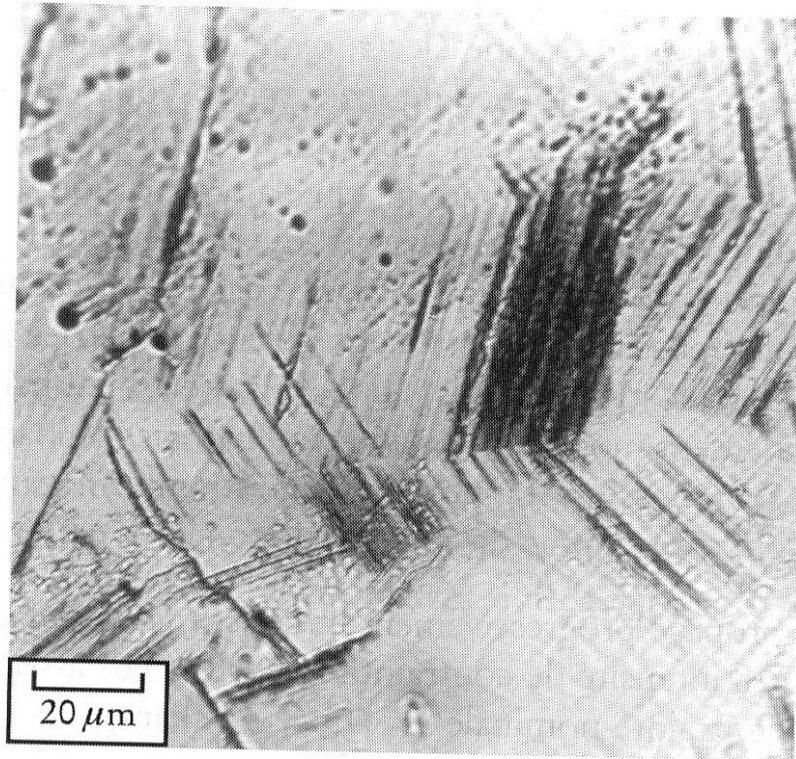
La vitesse de sollicitation peut aussi avoir un effet sur la ténacité d'un matériau.

Explication: les dislocations n'ont pas eu le temps de se déplacer...

b) Concentration de contrainte

à une température donnée, R_m est d'autant plus faible que l'entaille est aigue.

Phénomène de fatigue



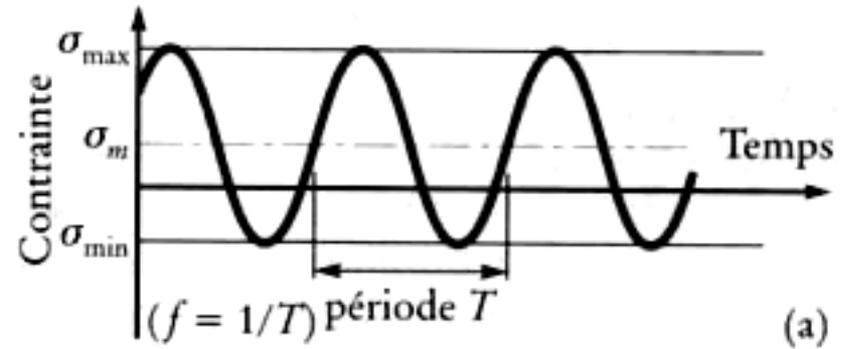
L'application de charges variables un très grand nombre de fois peut entraîner la rupture du matériau même si ces charges sont inférieures à la résistance ultime ou la limite élastique du matériau. Ce phénomène est connu sous le terme de **fatigue**.

On estime qu'environ **80-90% des ruptures** des matériaux sous charge de service sont **reliées à la fatigue**.

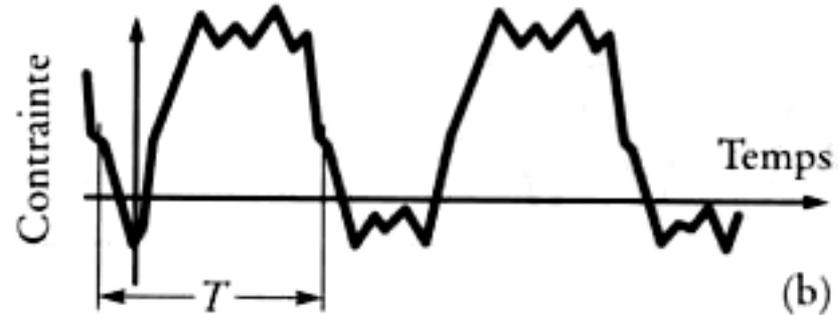
Un **chargement de fatigue** est caractérisé par une sollicitation variable dont la moyenne peut être nulle, positive ou négative.

Type de chargement

Sinusoidal



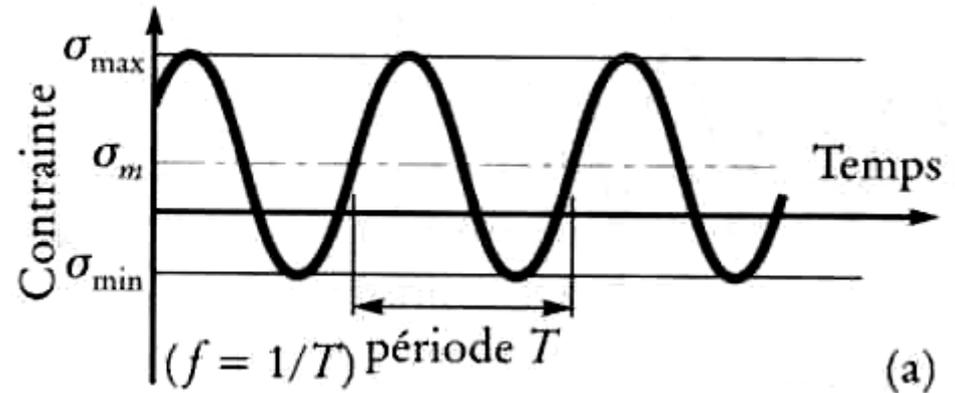
Périodique



Aléatoire



Paramètres



Amplitude de contraintes: $\frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$

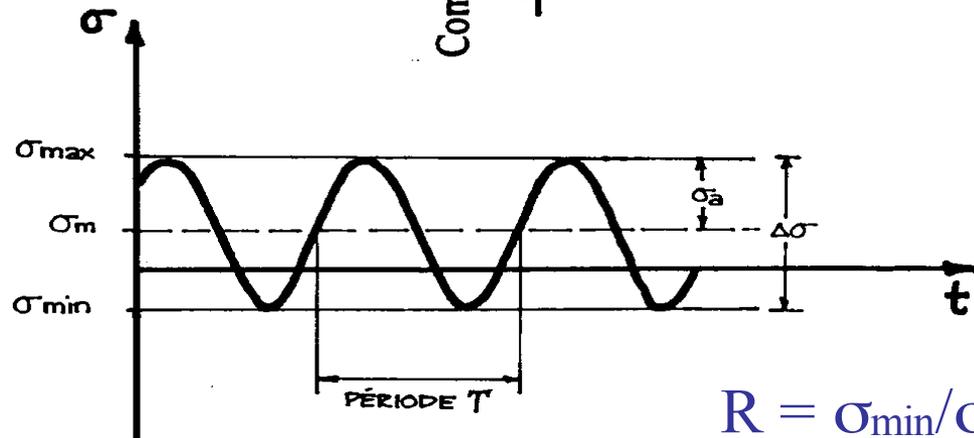
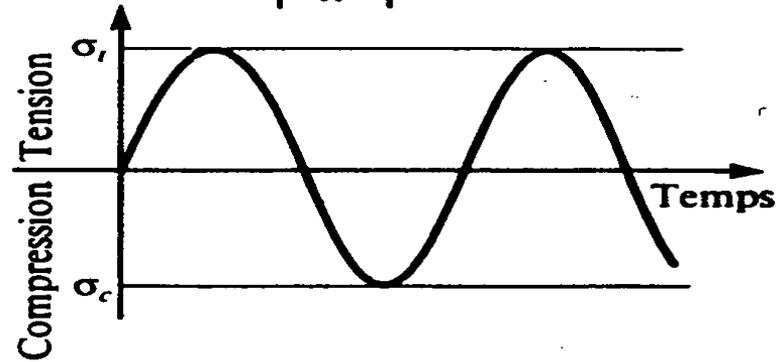
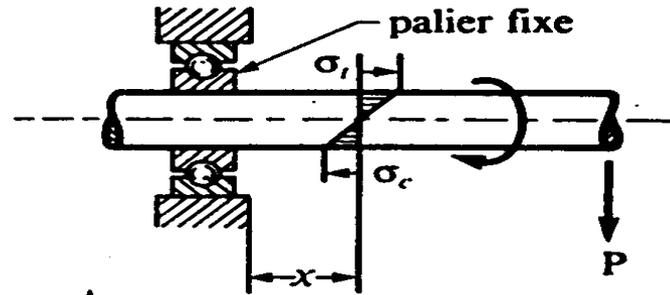
Variation de contraintes: $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

Contrainte moyenne: $\frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$

Rapport des contraintes (R): $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$

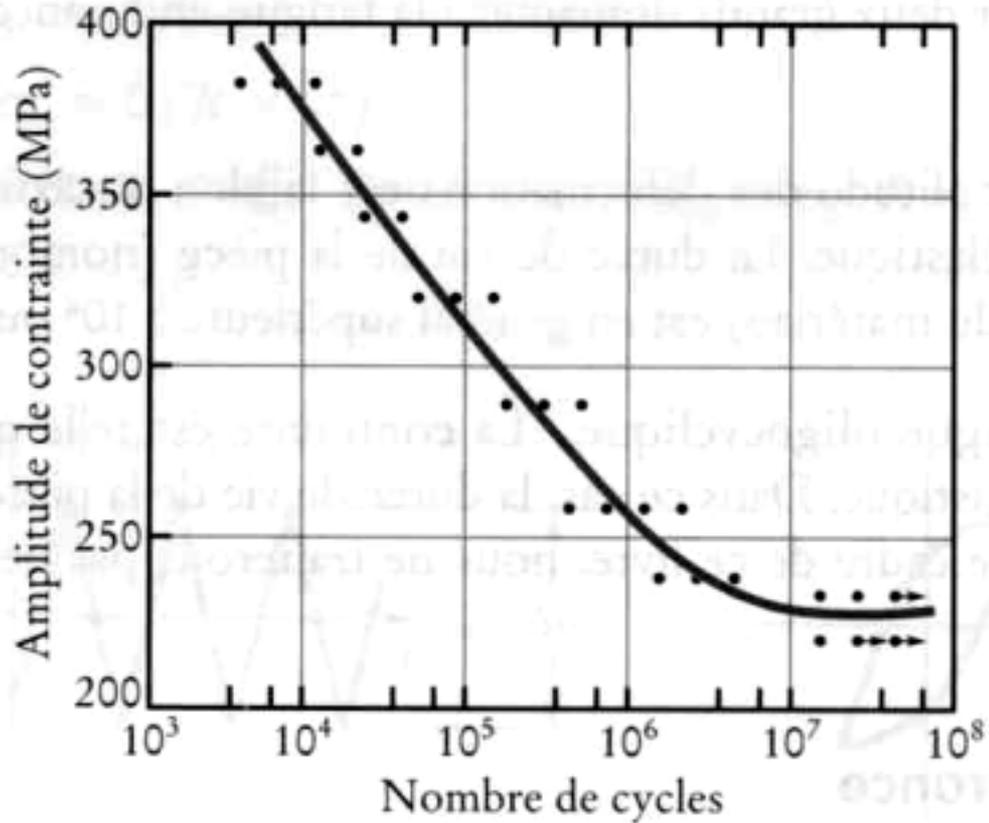
L'essai de fatigue

- Fatigue-endurance défor. élastiques $N \geq 10^4$ cycles
- Fatigue plastique défor. plastiques $N < 10^4$ cycles



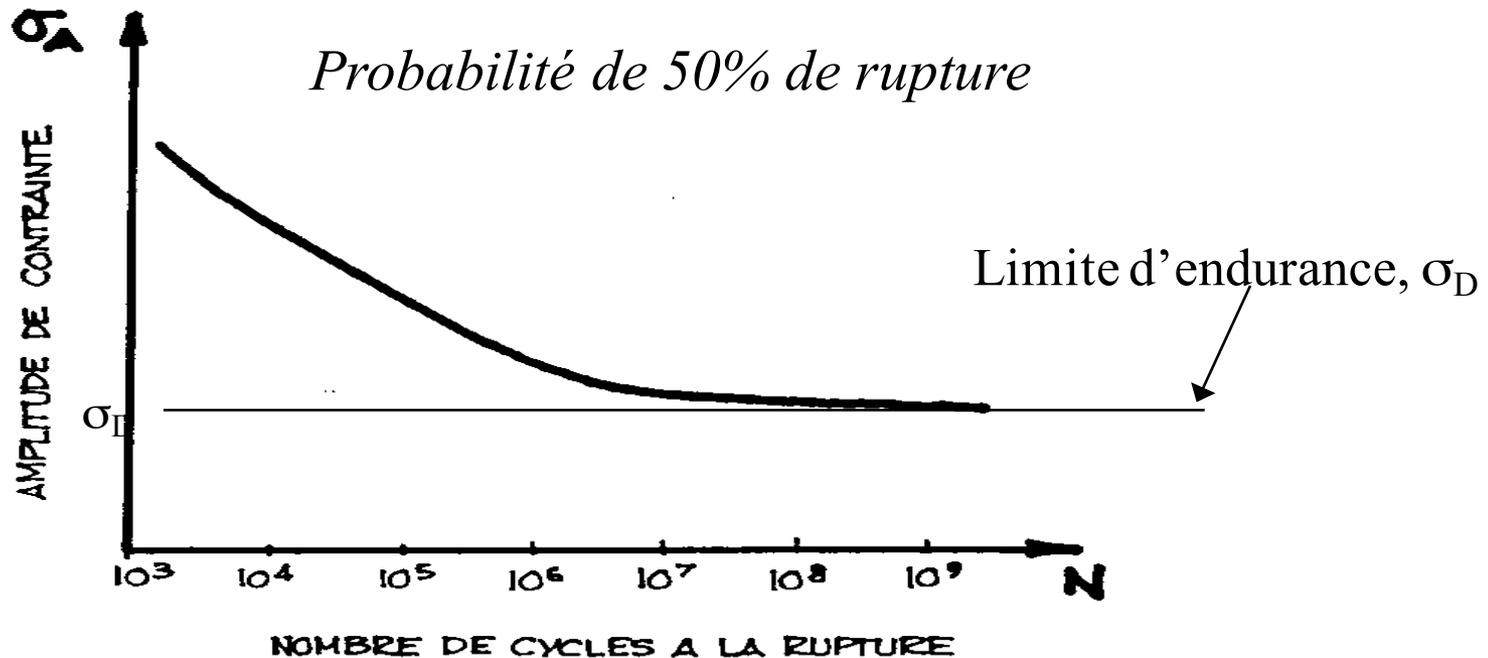
$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$$

À partir d'essais en laboratoire, on peut tracer une courbe d'endurance (courbe de Wöhler)

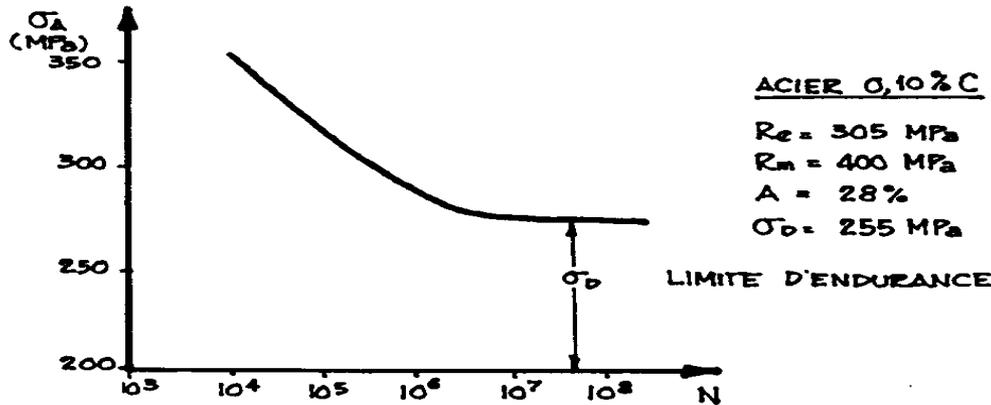


Courbe d'endurance

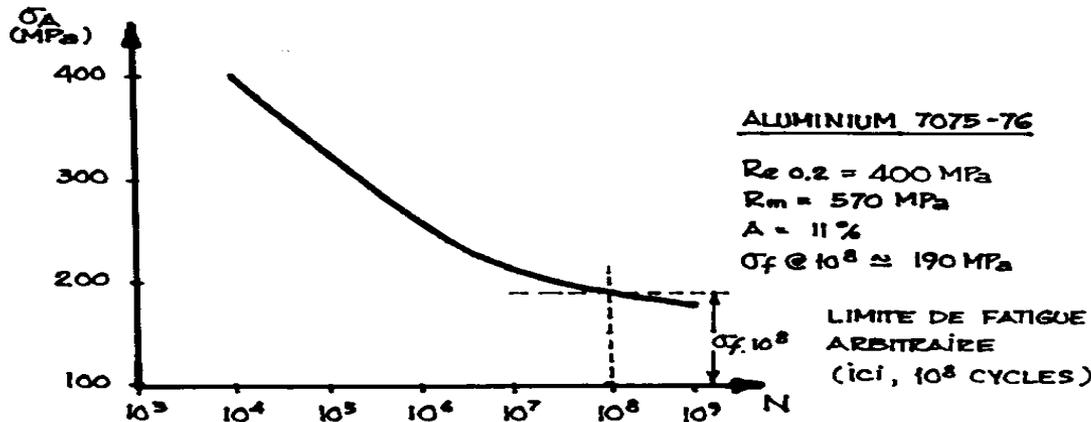
- zone de fatigue oligocyclique ($N < 10^4$ cycles)
- zone d'endurance limitée ($10^4 < N < 10^6$ cycles)
- zone de sécurité ($N > 10^7$ cycles)



La limite d'endurance asymptotique n'est pas présente chez tous les matériaux ductiles. Quant aux matériaux fragiles, le courbe d'endurance se réduit pratiquement à une ligne horizontale.



Tout chargement situé au-dessous de cette asymptote conduit à une durée de vie en fatigue « infinie ».



Limite de fatigue $< R_m$
 50% R_m pour les aciers
 35% R_m pour les alliages de Ni, Cu

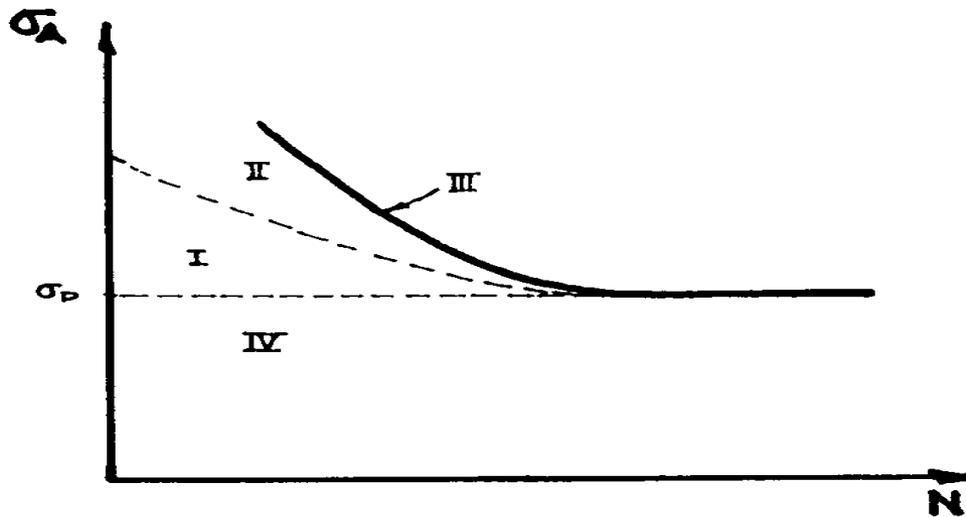
Mécanismes de fatigue

I Amorçage de l'endommagement

II Propagation de la fissure

III Rupture

IV Zone de non-rupture



Vitesse de propagation de la fissuration

- Les défauts conduisent à une concentration de contrainte qui entraînent l'apparition de fissure. Toutefois même une surface lisse peut progressivement développer des irrégularités
- On doit s'assurer que ces fissures n'atteindront pas la longueur critique qui conduira à une rupture fragile de la pièce.

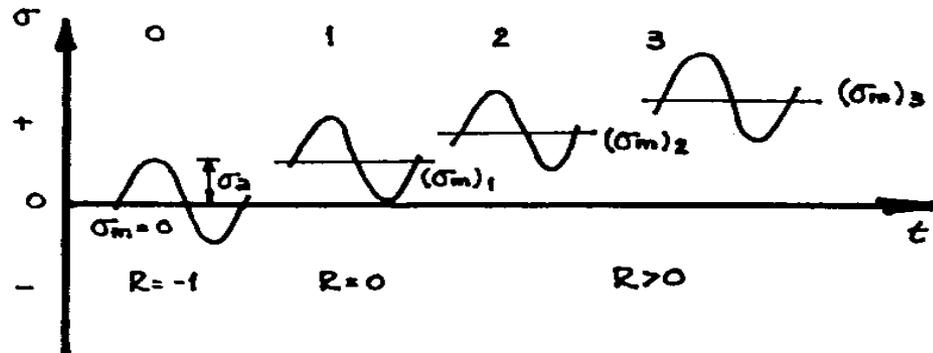
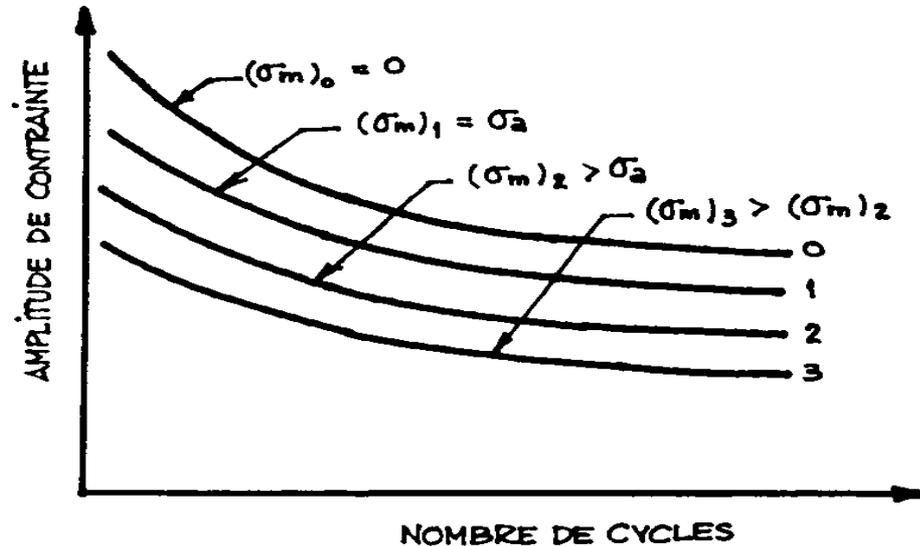
Facteurs influençant le comportement en fatigue

A. Les facteurs métallurgiques

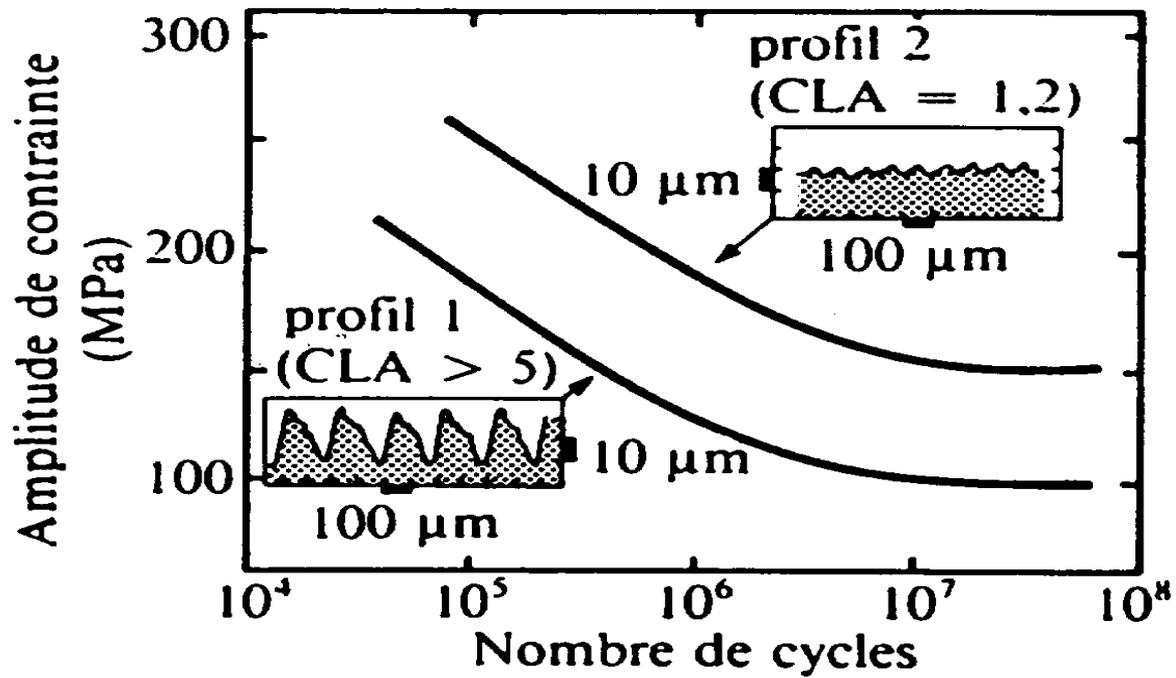
- composition chimique
- répartition des phases
- défauts de fabrication
- traitements thermiques
- microstructure

B. Les conditions de sollicitation

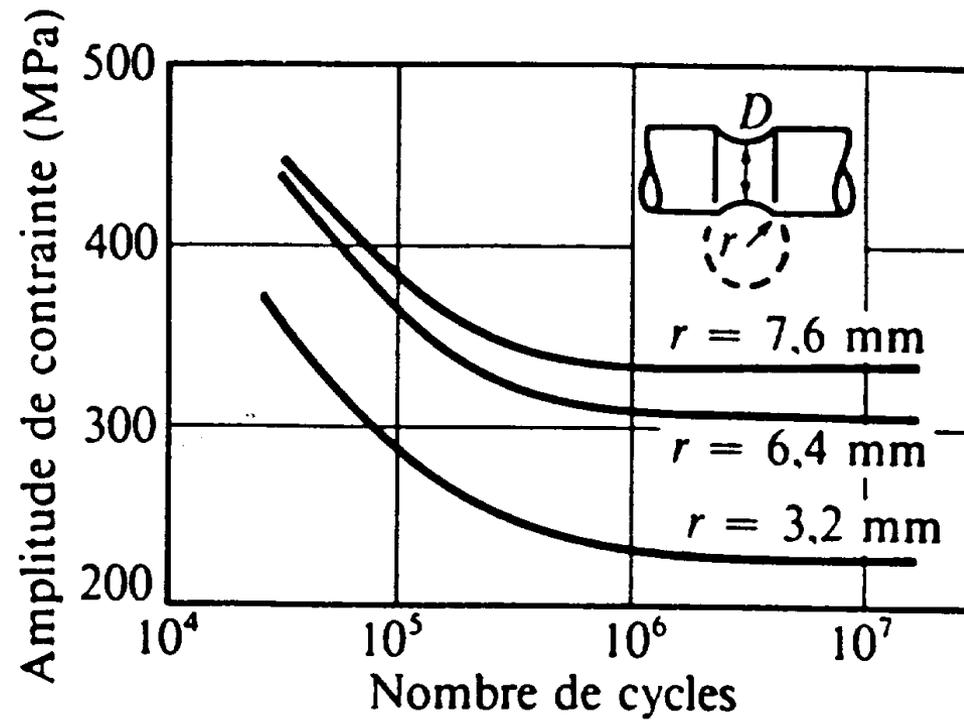
Pour une même amplitude de contrainte, la durée de vie est d'autant plus courte que la contrainte moyenne est élevée.



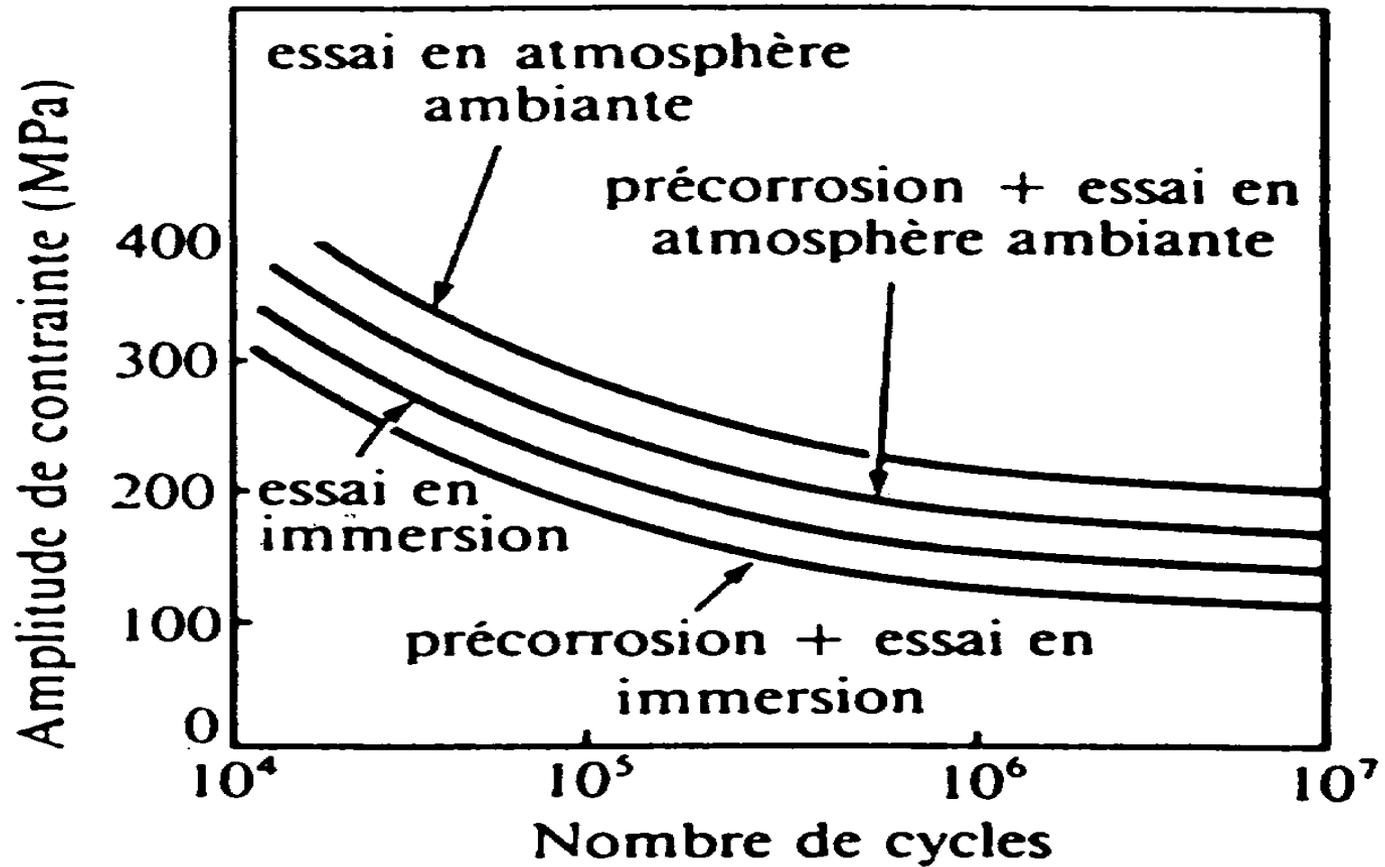
C. L'état de surface



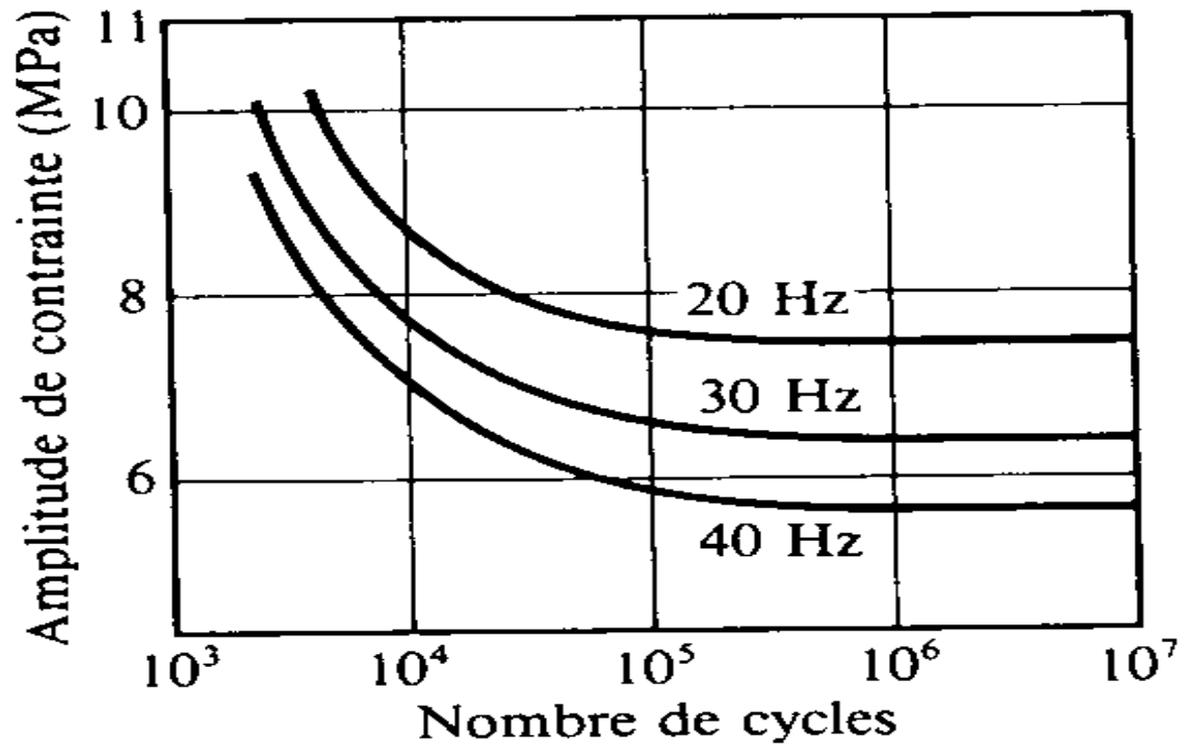
D. La géométrie



E. L'environnement



F. La fréquence d'oscillation



Fatigue thermomécanique

Des cycles thermiques sévères peuvent aussi provoquer un endommagement et la rupture

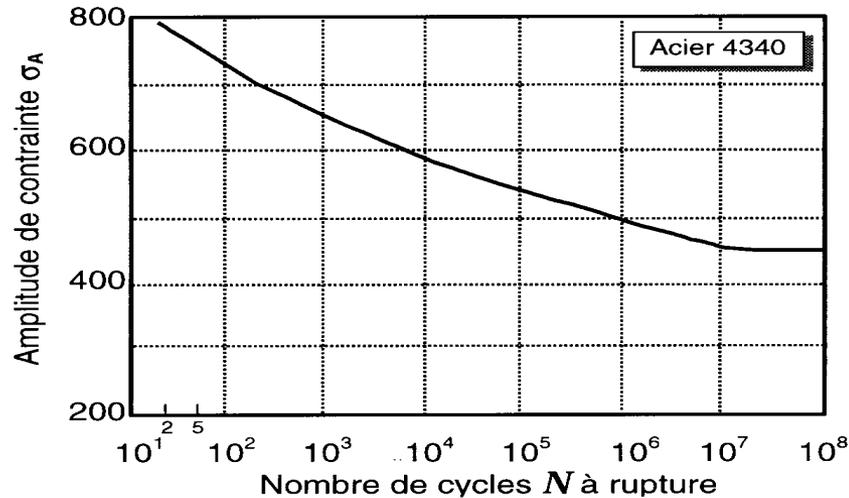
Exercice 2

Une pièce d'acier 4340 est soumise en service à des contraintes variant sinusoidalement dans le temps (rapport des contraintes $R = -1$). Les propriétés mécaniques de la pièce sont les suivantes:

$$\mathbf{R_{e0,2} = 800 MPa; R_m = 1000 MPa; A = 11%; K_c = 66 MPa.m^{1/2}}$$

Sous ce chargement cyclique, il se forme une fissure de fatigue caractérisée par un facteur géométrique $\alpha = 1,2$.

- A) Si σ_{\max} appliqué en service est de 500 MPa, quel sera la longueur critique l_{c1} entraînant la rupture brutale?
- B) Pour cette longueur combien de cycles N la pièce aura-t-elle subi?
- C) Si une surcharge accidentelle se produisait en service, quelle serait la longueur maximum l_{c2} de la fissure permettant d'éviter la rupture fragile.



A)
$$K_c = \alpha \sigma \sqrt{\pi l_c}$$

$$l_{c1} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\alpha \sigma_{\max}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{66 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}}{1,2 \times 500 \text{ MPa}} \right)^2 = 3,85 \times 10^{-3} \text{ m}$$

B) $R = -1 \rightarrow \sigma_a = 500 \text{ MPa} \rightarrow N = 10^6 \text{ cycles}$

C)
$$l_{c2} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\alpha R_{e0,2}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{66 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}}{1,2 \times 800 \text{ MPa}} \right)^2 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$