FISSURATION PAR FATIGUE

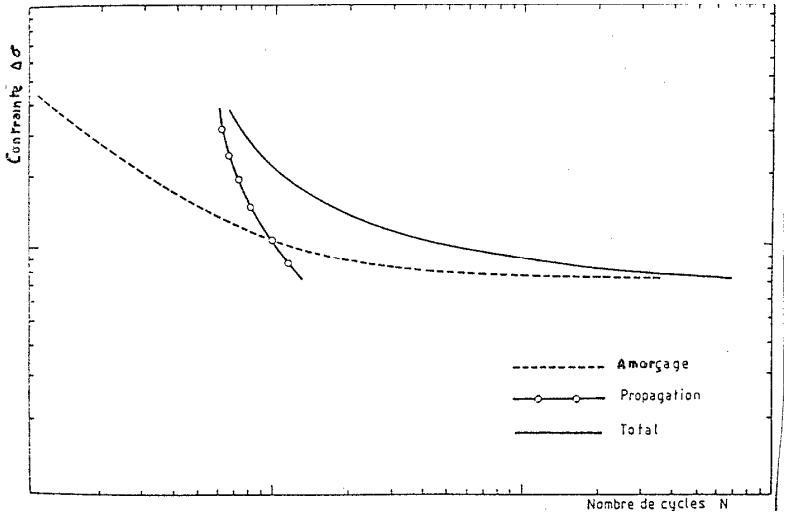
Claude ROBIN
Ecole des Mines de Douai

Fissuration par fatigue

- Introduction
- Description de la loi de Paris
- Paramètres ayant une influence sur la vitesse de fissuration
- Mécanismes de la fissuration par fatigue
- Modélisation

introduction

- La connaissance de la limite d'endurance est une indication insuffisante si l'on considère qu'une structure réelle contient déjà des défauts
  - Pour les faibles durées de vie : le nombre de cycles d'amorçage Ni représente 0,5 % de la durée de vie totale Nf
  - Pour les longues durées de vie : Ni ~ 90 % Nf



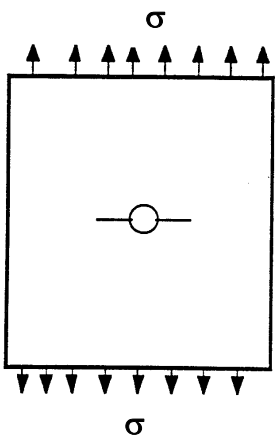
démarche adoptée

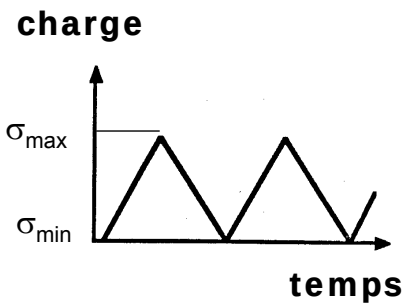
- on considère qu'une structure contient des défauts dès sa mise en service, ce qui conduit à :
  - mesurer la taille des défauts
  - déterminer la taille de défaut admissible
  - déterminer sa vitesse de progression
  - connaître les efforts ou contraintes agissant sur la structure
  - calculer sa durée de vie

- La connaissance des lois de propagation de fissure est alors indispensable

Description de la loi de Paris : premières observations

- Examen de la progression d'une fissure dans une plaque de grandes dimensions contenant une fissure centrale de longueur 2a et soumise à un chargement de traction périodique $\Delta\sigma$

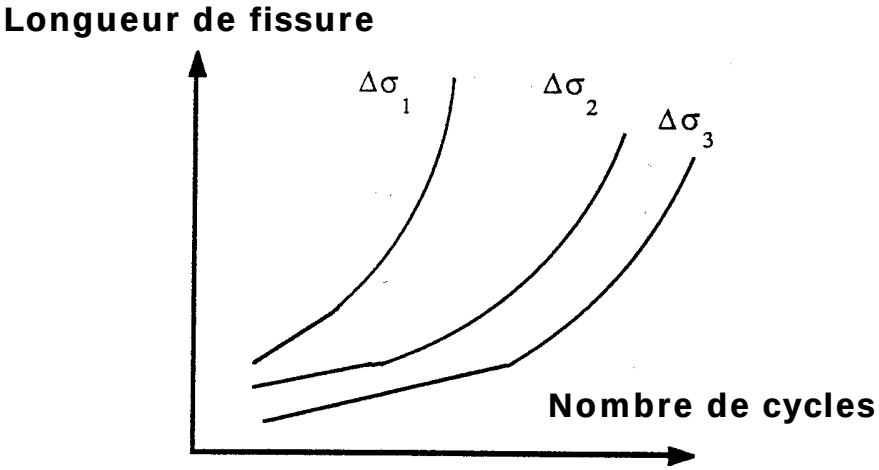




$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

observations

- La fissure progresse de plus en plus rapidement lorsque sa longueur croît
- La fissure progresse d'autant plus rapidement que l'amplitude de contrainte $\Delta\sigma$ est importante ($\Delta\sigma_1 > \Delta\sigma_2 > \Delta\sigma_3$)
- Le matériau reste élastique dans son ensemble, la plasticité étant confinée à la pointe de la fissure

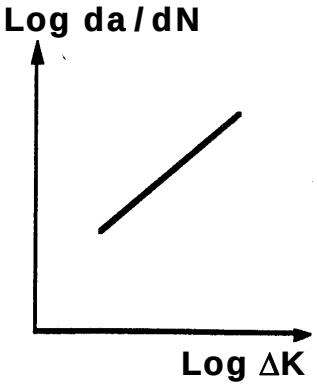


la vitesse de fissuration dépend du chargement appliqué et de la longueur du défaut

Expression de la vitesse de fissuration

- On exprime la vitesse de fissuration en fonction de la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK au cours d'un cycle de chargement : $K_I = \beta.\sigma_g\sqrt{\pi a}$

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$



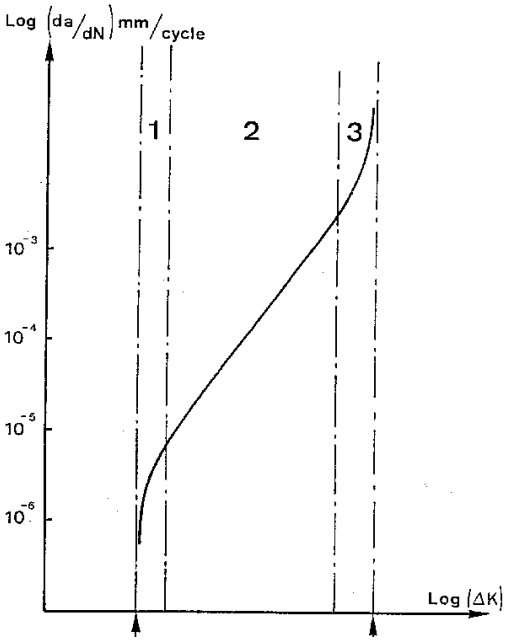
On observe une variation linéaire de la vitesse de fissuration en fonction de ΔK dans un diagramme bi-logarithmique :

Loi de Paris

$$da/dN = C\Delta K^m$$

Description complète de la courbe de vitesse de fissuration

- On observe trois stades



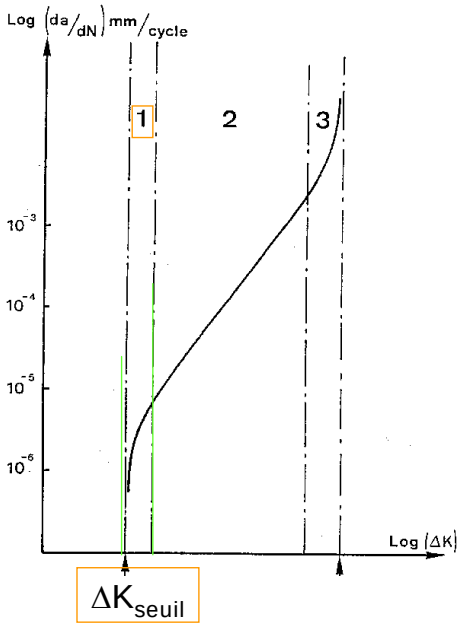
Le **stade 1,** domaine des faibles vitesses de fissuration

Le **stade 2,** domaine linéaire

Le **stade 3,** domaine des fortes vitesses de propagation

Description du stade 1

- domaine des faibles vitesses de fissuration $10^{-8} < da/dN < 10^{-6}$ mm/cycle

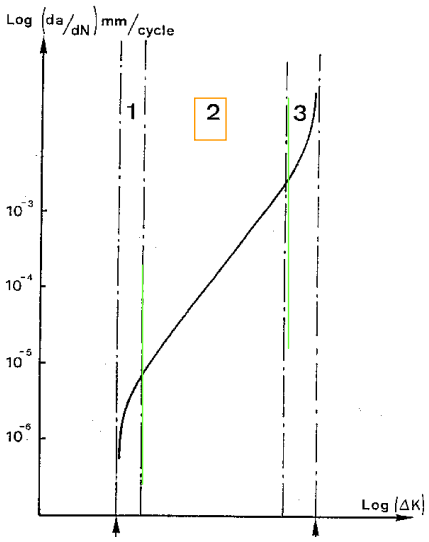


ΔK_s : seuil de non fissuration.

Valeur de ΔK en dessous de laquelle une fissure existante ne se propage pas

Description du stade 2

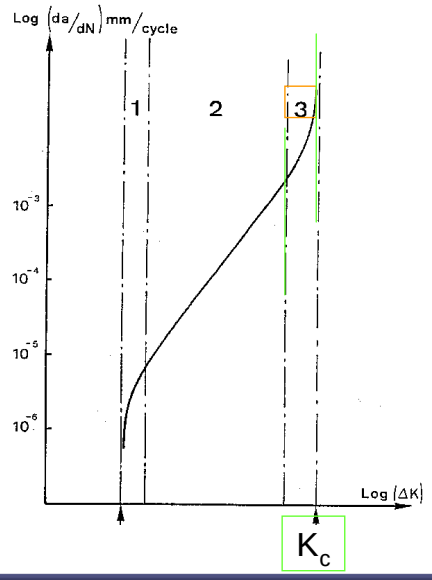
- stade linéaire, La loi de Paris s'applique
  - Pour un chargement à amplitude constante donné, $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ = constante, la valeur de ΔK augmente lorsque la longueur de fissure croît et la vitesse de fissuration augmente



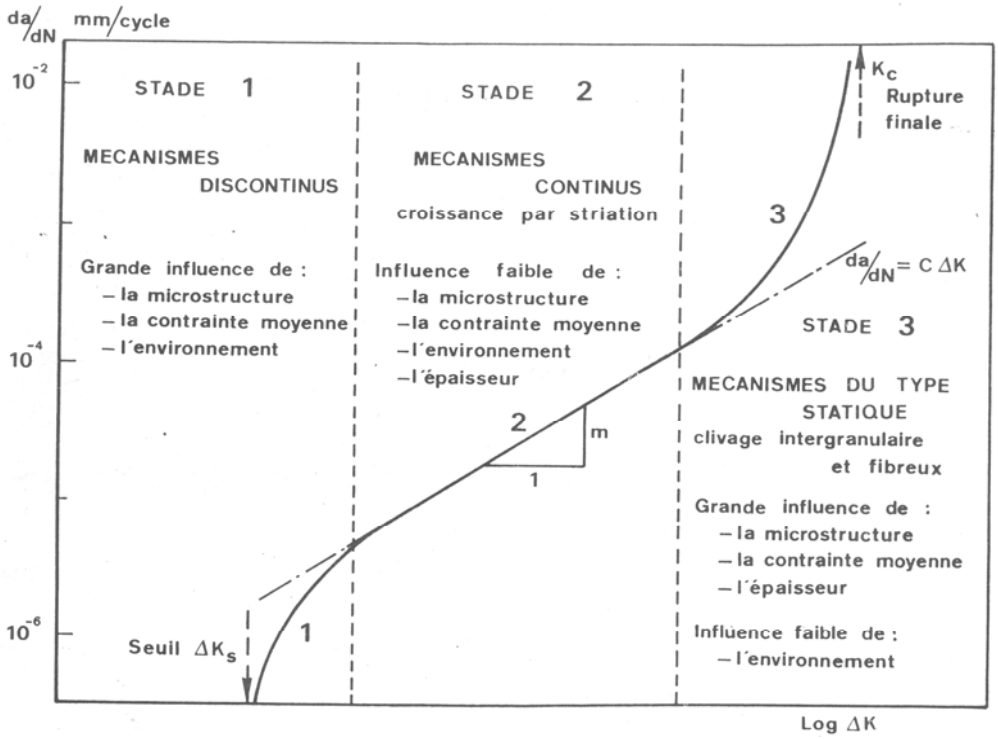
L'intégration de la loi de Paris permet de calculer la durée de vie

Description du stade 3

- Fortes vitesses de propagation jusqu'à obtention de la rupture brutale lorsque K atteint la valeur K_c

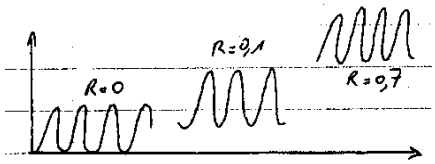


Paramètres ayant une influence sur la vitesse de fissuration

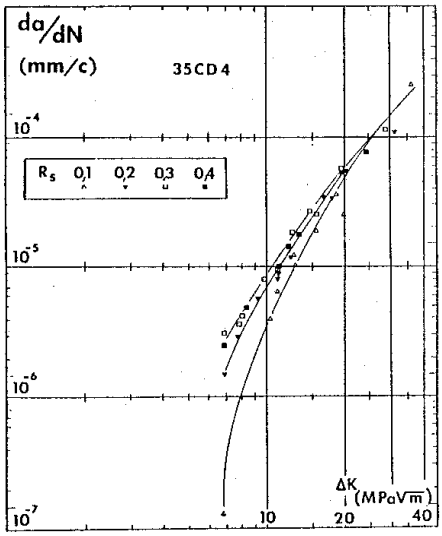


Influence de la charge moyenne

- Bien que le paramètre principal contrôlant l'avancement de la fissure soit la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK, la charge moyenne a une influence
  - la vitesse de fissuration augmente quand la charge moyenne augmente (quand le rapport R augmente)
  - L'influence de R est plus marquée dans les stades 1 et 3

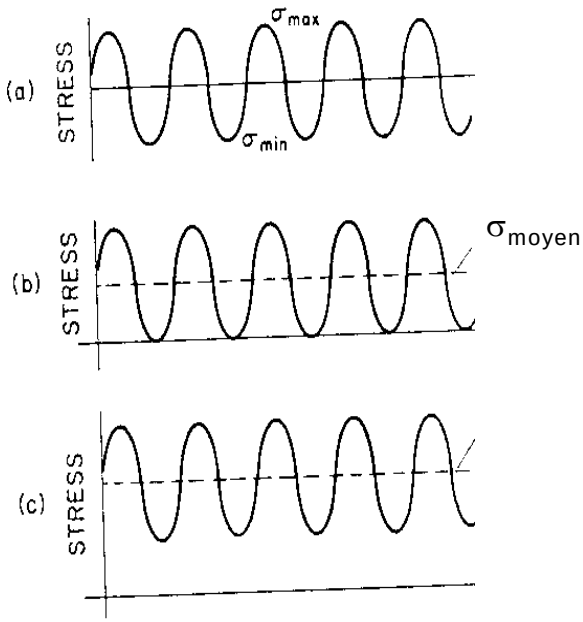


$$R = \frac{P_{mim}}{P_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$



Influence de la contrainte moyenne

Différents types de chargements



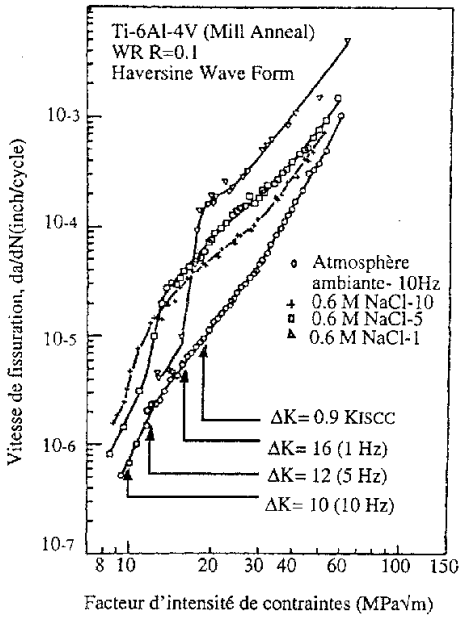
R = -1

R = 0

0 < R ≤ 1

Influence de l'environnement

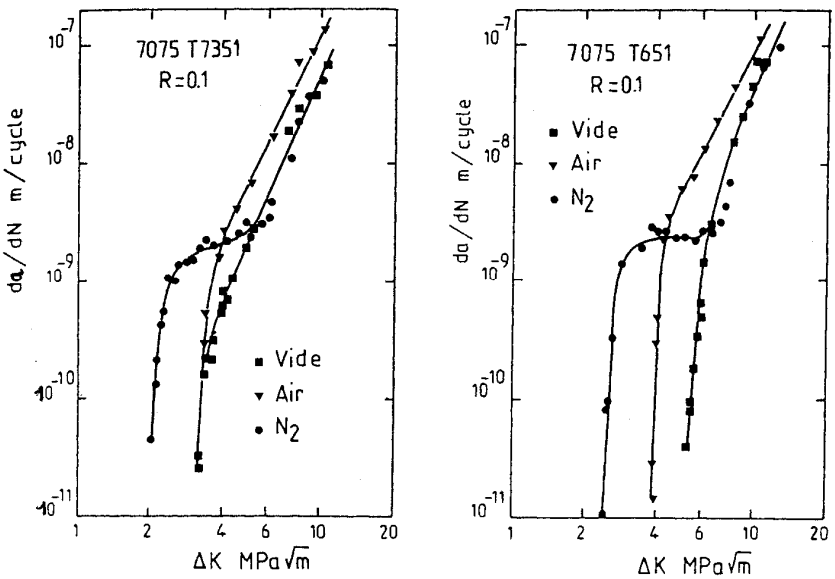
- En présence d'un environnement agressif, la vitesse de fissuration augmente, le phénomène de corrosion se superposant au phénomène de fatigue



Influence de la valeur de K_{1SCC}

Influence de l'environnement

- Si l'on compare le comportement du matériau entre air et vide, la vitesse de fissuration est de 10 à 100 fois plus faible sous vide, surtout au niveau de ΔK_s

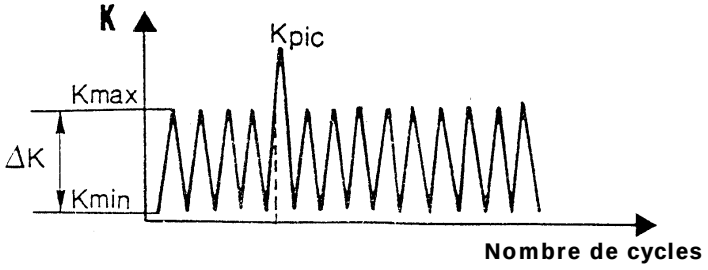


Influence de l'histoire du chargement

- La courbe de fissuration est tracée pour un chargement d'amplitude constante, non représentatif des chargements réels s'appliquant en service
- Les durées de vie calculées à l'aide de la loi de Paris sont souvent erronées car trop conservatives
- L'histoire du chargement, qui n'est pas prise en compte lors de l'intégration de la loi de Paris, a une grande influence sur la vitesse de fissuration

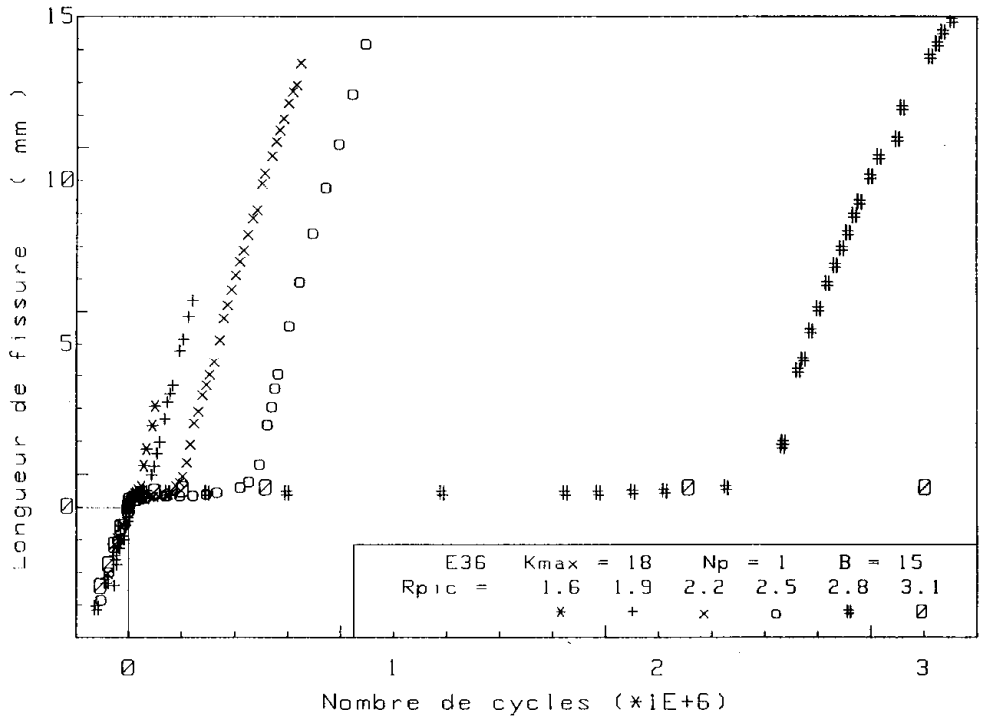
Cas d'un chargement à amplitude variable : surcharges en traction

- éprouvette CT
- machine servo-hydraulique asservie en charge
- essais conduits à ΔK constants par une décroissance progressive de la charge appliquée.
- pour une longueur donnée de fissure, application d'une surcharge et reprise du chargement initial.



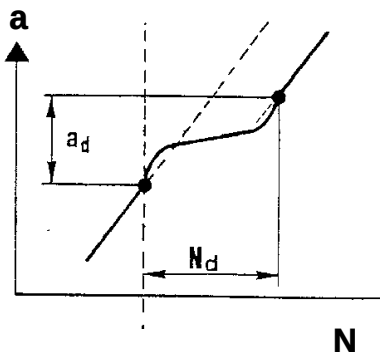
Influence de surcharges sur la vitesse de fissuration

- La loi de Paris n'est plus vérifiée



Quantification de l'influence des surcharges

- On définit :
  - a_d : longueur de fissure affectée par la surcharge.
  - N_d : nombre de cycles affectés par la surcharge.



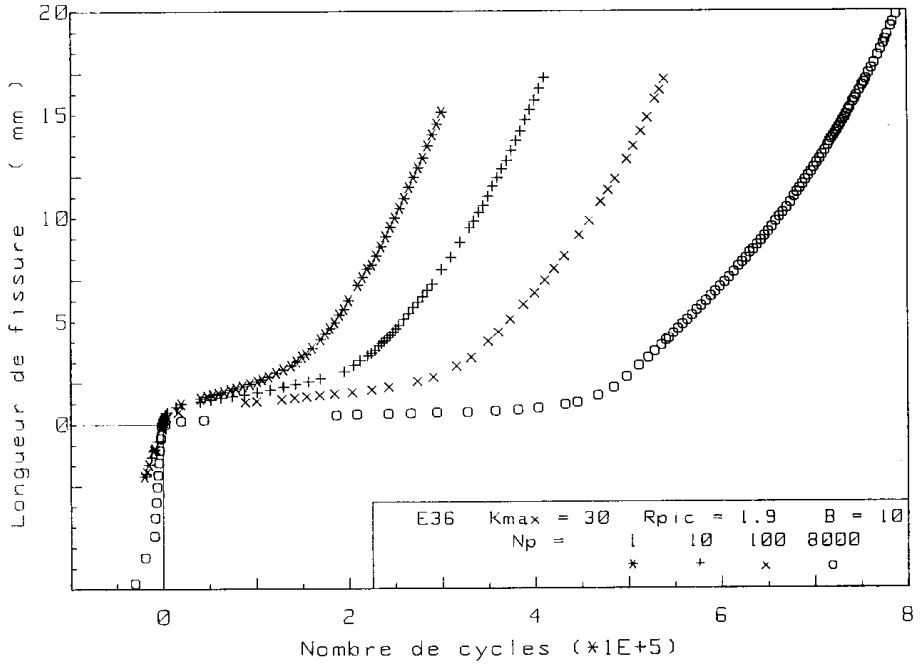
- Le retard est affecté par :
  - le rapport de surcharge
  - Le nombre de pics de surcharge
  - Le niveau du chargement de base
  - La nature du matériau
  - L'épaisseur de l'éprouvette.

Quantification de l'influence des surcharges :

- Le retard est d'autant plus important que le nombre de cycles de surcharge est élevé
- Le retard est d'autant plus important que le matériau est ductile.
- Plus le niveau de chargement initial ΔK est faible, plus de retard est important
- Le retard est d'autant plus fort que l'épaisseur de l'éprouvette est faible

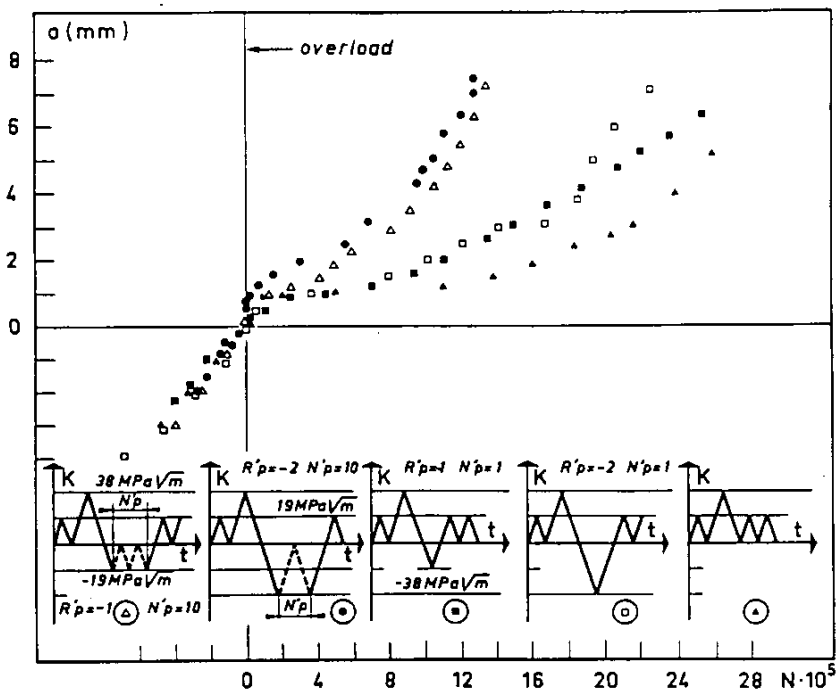
Quantification de l'influence des surcharges

- Influence du nombre de cycles de surcharges pour un taux de surcharge donné



Cas d'un chargement à amplitude variable : surcharges en compression

- L'application d'une surcharge en compression provoque une augmentation de la vitesse de fissuration ou, si elle est couplée à une surcharge de traction, elle minimise l'influence de cette surcharge en diminuant notablement le retard



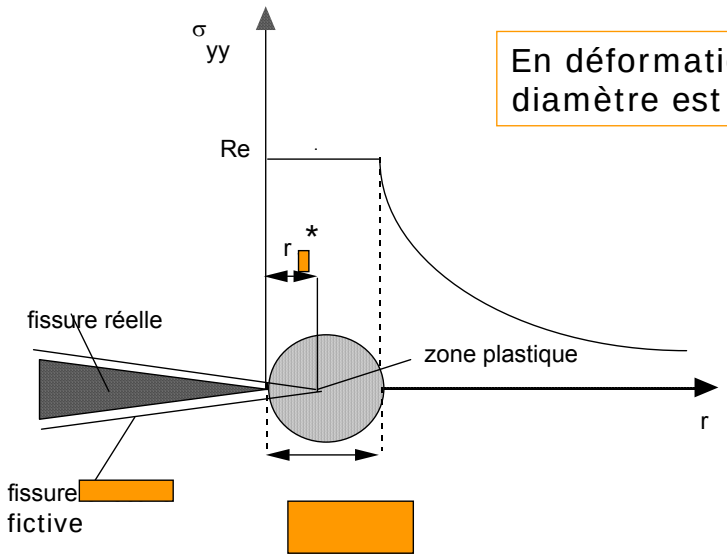
Mécanismes de la fissuration par fatigue

- Deux mécanismes permettent d'expliquer le comportement d'une fissure de fatigue
  - Les zones plastifiées à la pointe de la fissure
  - Le phénomène de fermeture de fissure

Rappel : zone plastifiée d'Irwin en MLER

En contrainte plane, le diamètre de la zone plastifiée d'Irwin est : $R_p = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K}{\mathrm{Re}}\right)^2$

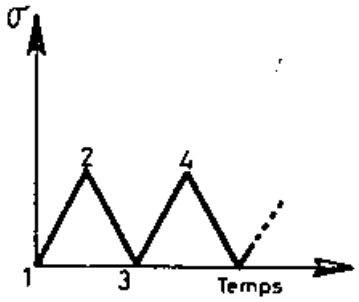
En déformation plane, ce diamètre est 3 fois plus petit

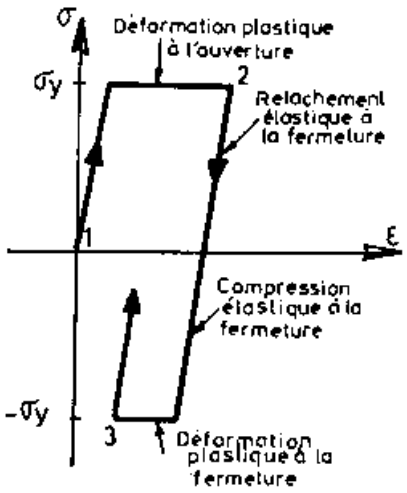


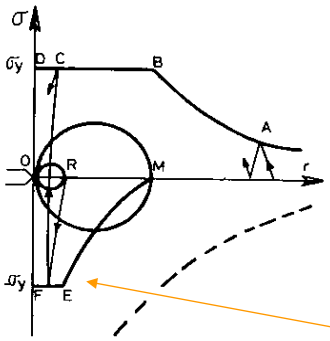
$r_p = 2r^*$

Formation des zones plastifiées

- En fatigue, il existe deux zones plastifiées : l'une crée au chargement, l'autre au déchargement







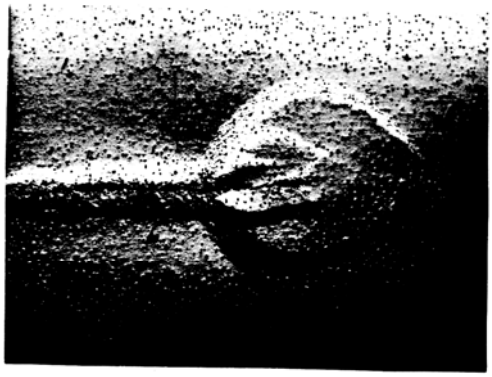
Existence de contraintes résiduelles de compression à la pointe de la fissure

Caractéristiques des zones plastifiées en fatigue

- Existence de deux zones plastifiées
- La zone cyclique est quatre fois plus petite que la zone monotone
- En résumé, à proximité de la pointe de la fissure, on trouve 3 régions :
  - Une première zone, la plus éloignée du fond de fissure dans laquelle les déformations sont élastiques,
  - une deuxième zone, plastifiée lors de l'ouverture de la fissure, dans laquelle les déformations sont faibles et uniformes,
  - une troisième zone où l'amplitude de la contrainte est de l'ordre de 2Re, la plastification se produit sous l'effet de la fermeture de la fissure et les déformations sont importantes.

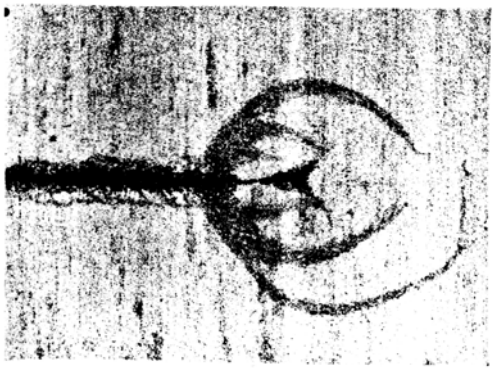
Zone plastifiée en Fond de fissure

a)



Eclairage en lumière rasante

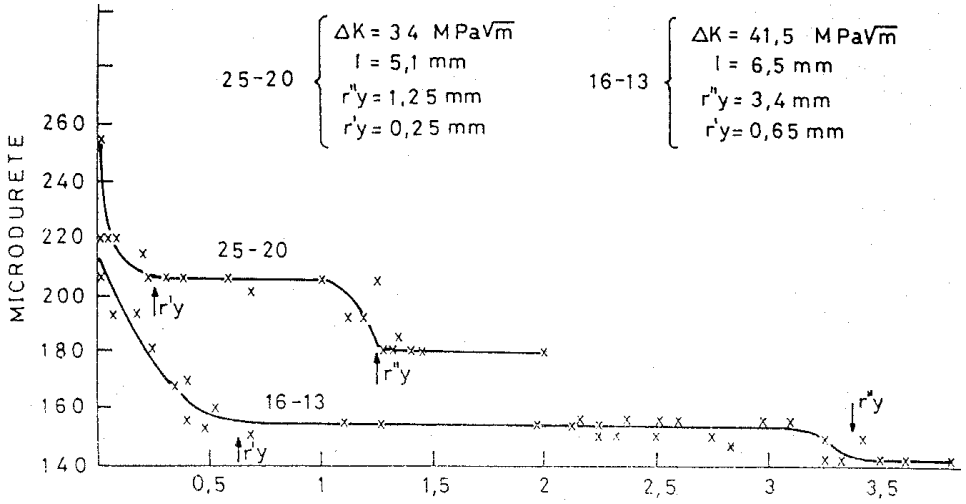
b)



Attaque métallographique

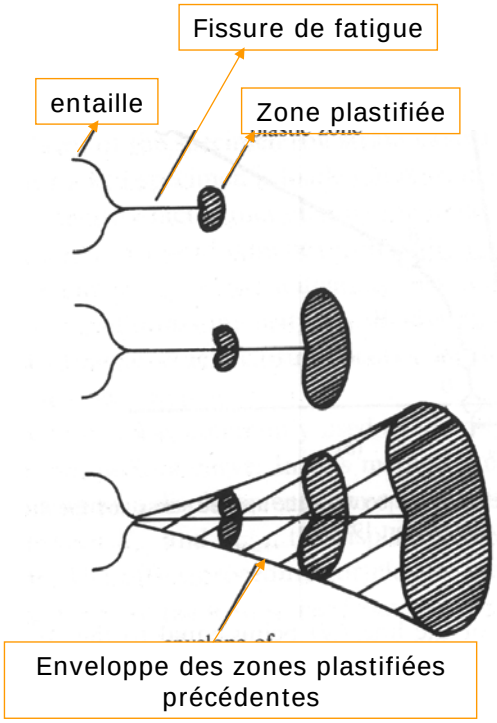
Preuves expérimentales de l'existence des zones plastifiées

- méthodes expérimentales de détermination par mise en évidence
  - de la contraction en surface
  - de changements microstructuraux créés par la plastification
- microdureté, rugosité, attaque métallographique



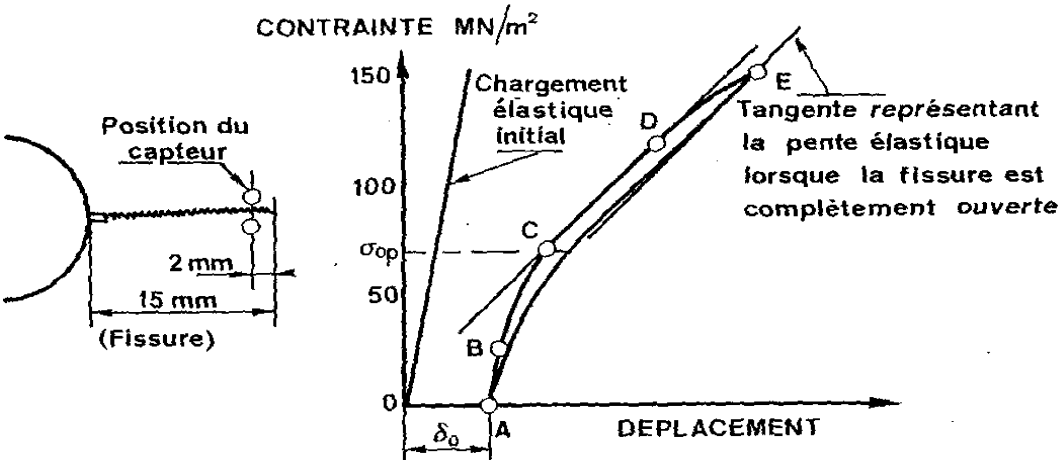
Concept de fermeture de fissure

- Lorsque la fissure se propage, un sillage plastique se développe le long du trajet de la fissure, siège de contraintes résiduelles de compression.
- Les contraintes de compression s'opposent à la contrainte extérieure appliquée de traction, se traduisant par une fermeture de la fissure à faible charge (expérience de Elber).



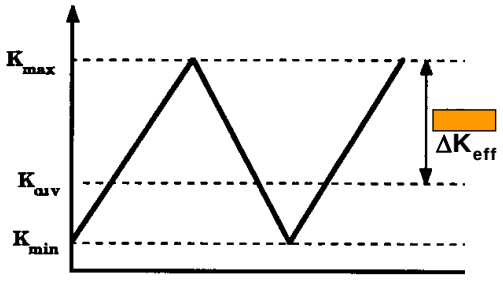
Concept de fermeture de fissure

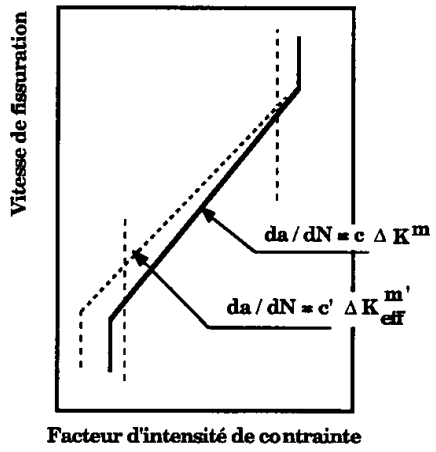
- Expérience d'Elber



Loi de fissuration d'Elber

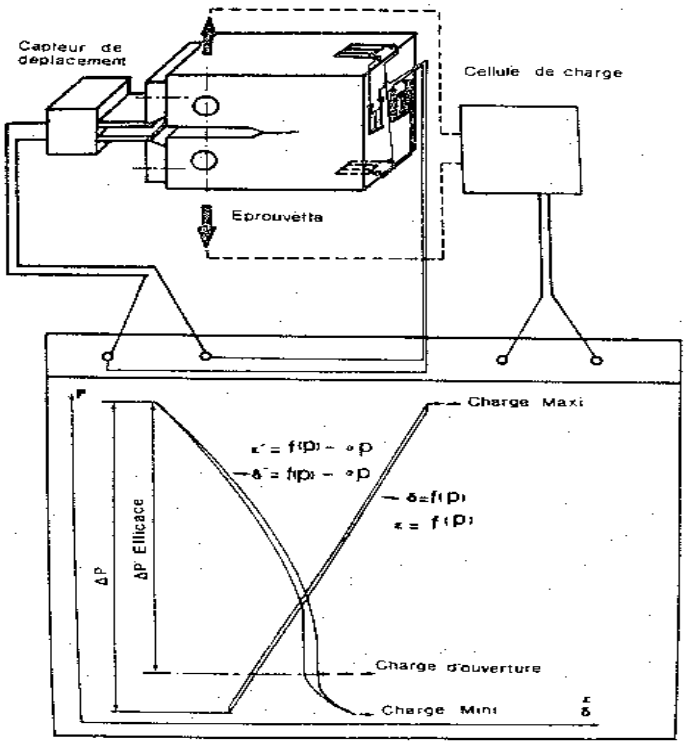
- Considérant qu'une fissure ne peut progresser que si elle est ouverte, Elber a proposé d'utiliser comme loi de fissuration une loi de Paris modifiée ne tenant compte que de la partie efficace du chargement





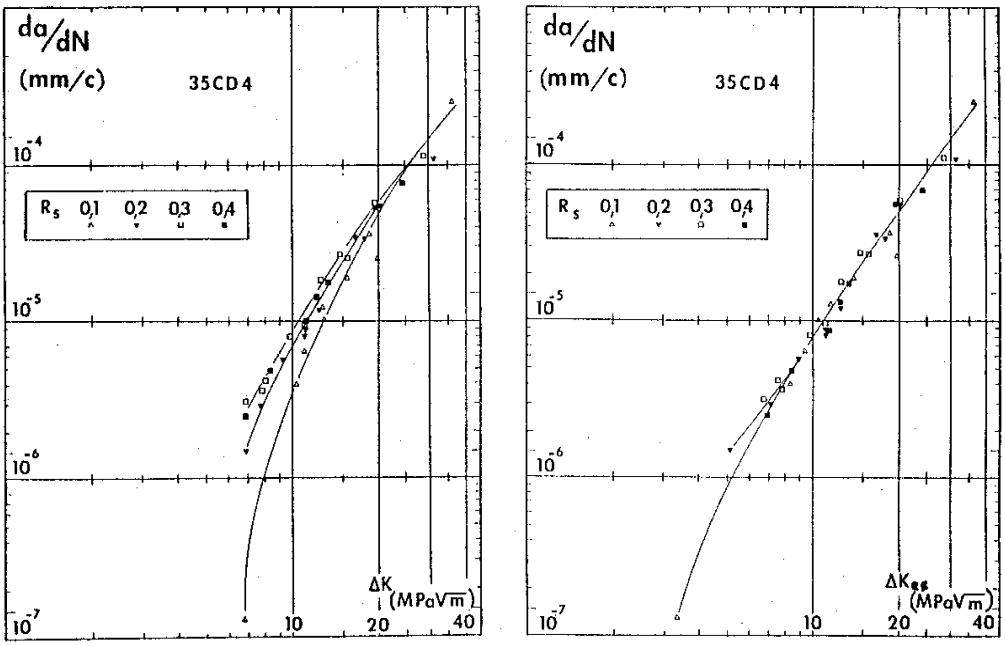
Mesure du point d'ouverture de fissure

- Dispositif expérimental



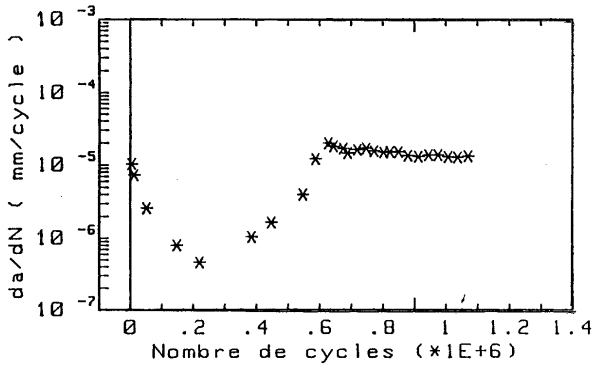
Influence de la charge moyenne

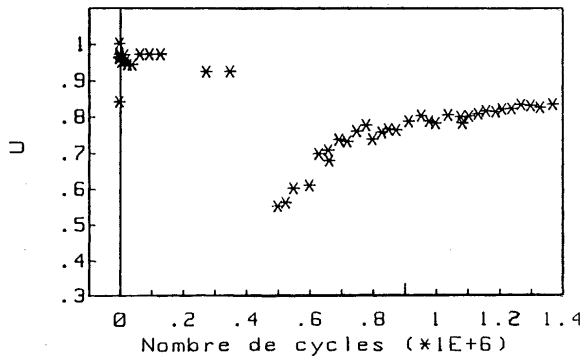
- Un tel concept permet de bien tenir compte de l'influence de la charge moyenne



Application de surcharges

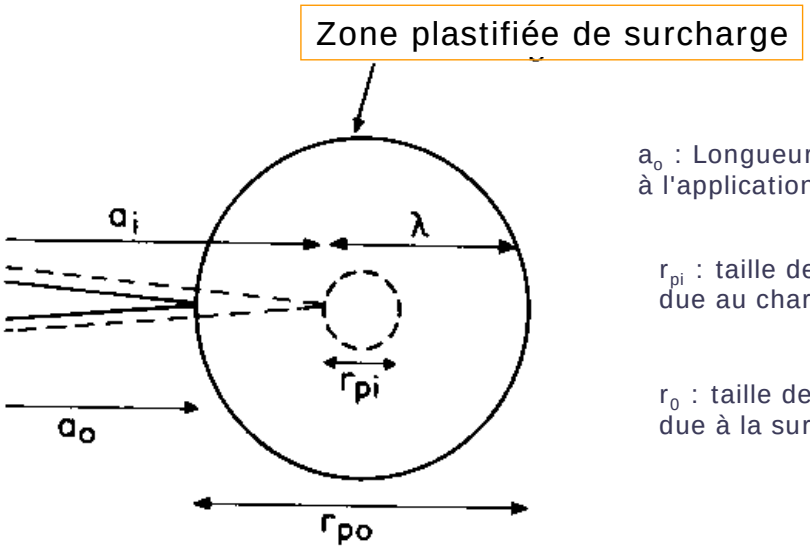
- L'application d'une surcharge s'accompagne d'un changement sensible du point d'ouverture de fissure.
- Il est cependant difficile d'expliquer en totalité le comportement d'une fissure de fatigue sous chargement aléatoire à l'aide de ce paramètre





Modélisation : prédiction de la durée de vie

- Modèle de Wheeler



a_o : Longueur de fissure à l'application de la surcharge

r_{pi} : taille de zone plastifiée due au chargement de base

r_0 : taille de zone plastifiée due à la surcharge

$$\left(\frac{da}{dN}\right) \text{après surchage} = \phi\left(\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}}\right) \text{amplitude constante}$$

Modèle de Wheeler

- Détermination du facteur de retard Φ

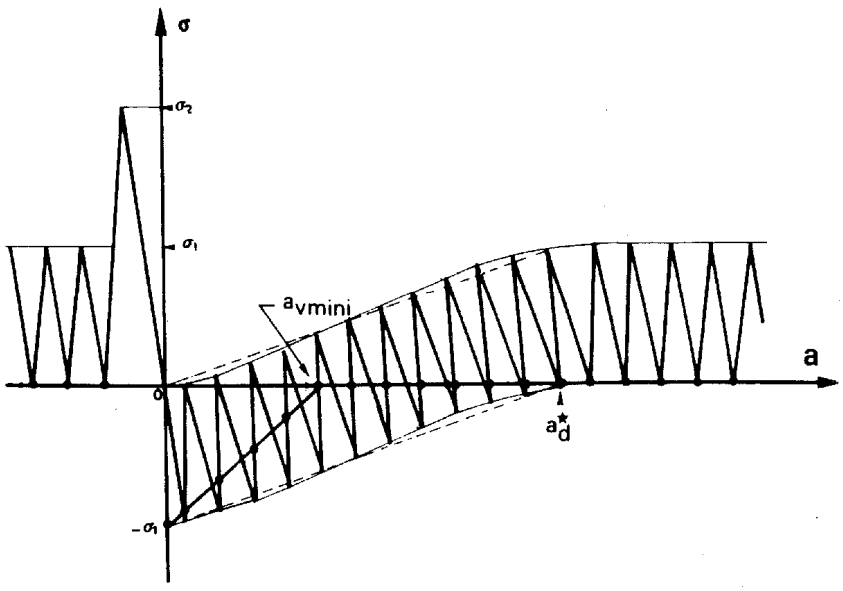
$$\phi = \left(\frac{r_{pi}}{a_o + r_{po} - a_i} \right)^m \qquad \text{si} \qquad a_i + r_{pi} < a_o + r_{po}$$

$$\Phi = 1 \qquad \text{si} \qquad a_i + r_{pi} \geq a_0 + r_{p0}$$

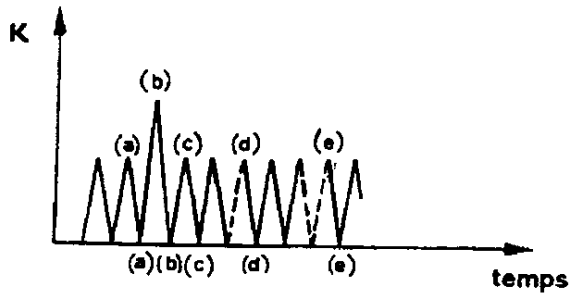
m : facteur déterminé de façon empirique

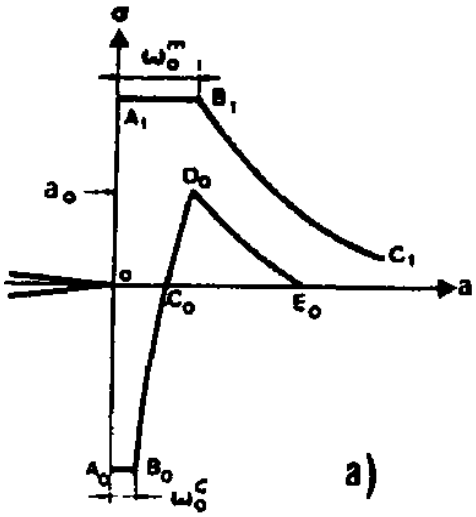
Le modèle de Wheeler prédit un retard à la fissuration jusqu'à ce que que la zone plastifiée courante vienne tangenter la zone plastifiée de surcharge

Modèle de Matsuoka



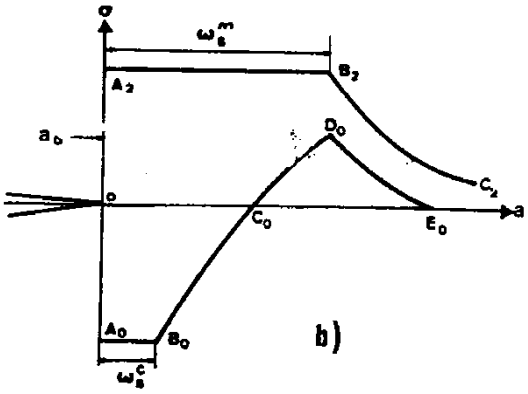
Modèle de Matsuoka

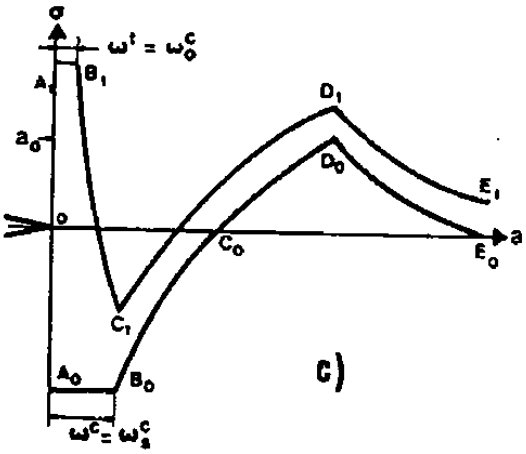




Cas du chargement à amplitude constante

Modèle de Matsuoka



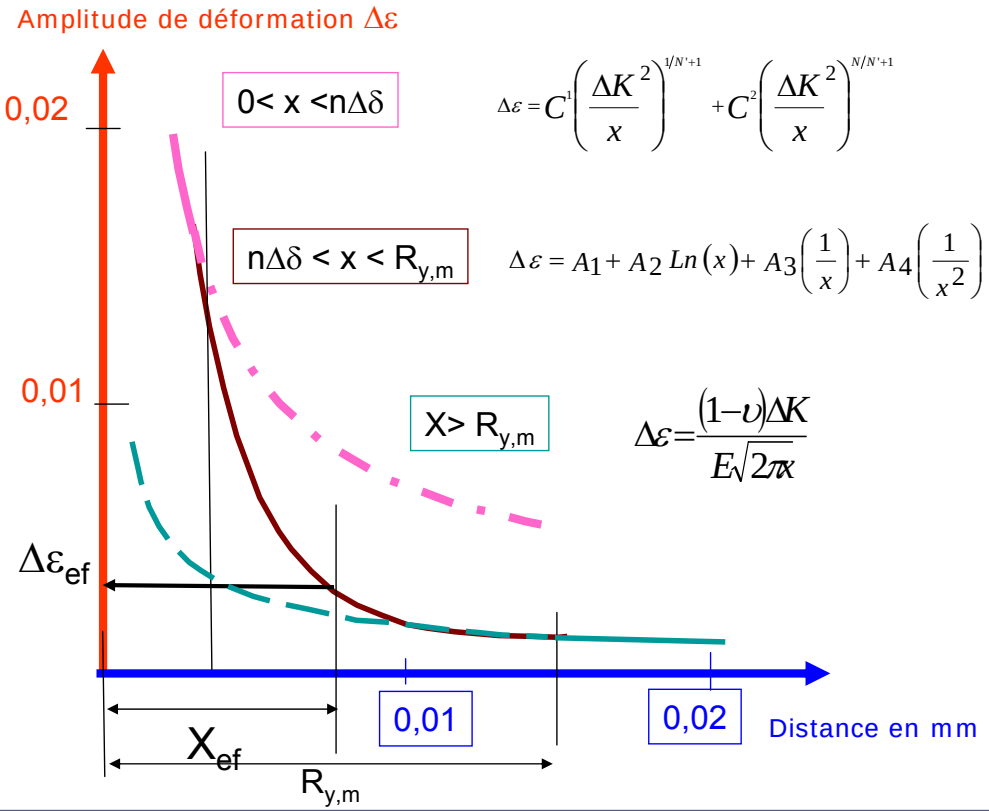


Après application de la surcharge

Modèle de Glinka

- La progression d'une fissure de fatigue est modélisée en considérant une propagation incrémentale par rupture de « mini-éprouvettes » soumises à une déformation plastique importante; On suppose que ces mini-éprouvettes se rompent en fatigue oligocyclique avec la même durée de vie qu'une macro-éprouvette lisse

Distribution des déformations en fond de fissure



$$\Delta\varepsilon = C^1\left(\frac{\Delta K^2}{x}\right)^{1/N'+1} + C^2\left(\frac{\Delta K^2}{x}\right)^{N/N'+1}$$

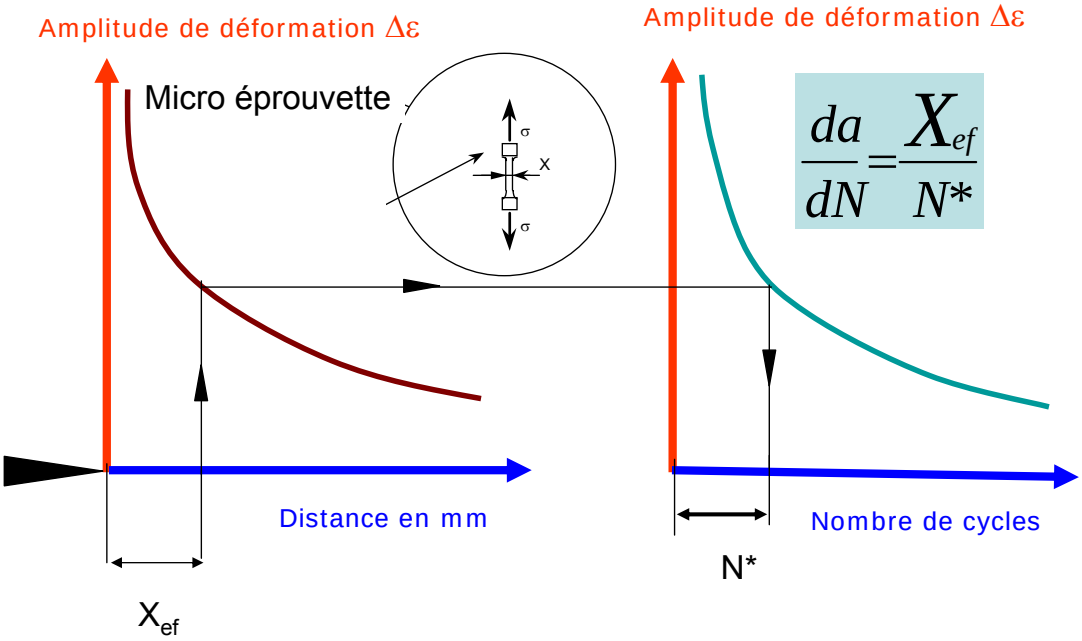
$$\Delta\varepsilon = A_1 + A_2\,Ln(x) + A_3\left(\frac{1}{x}\right) + A_4\left(\frac{1}{x^2}\right)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(1-\upsilon)\Delta K}{E\sqrt{2\pi x}}$$

Concept de la micro éprouvette de fatigue oligocyclique

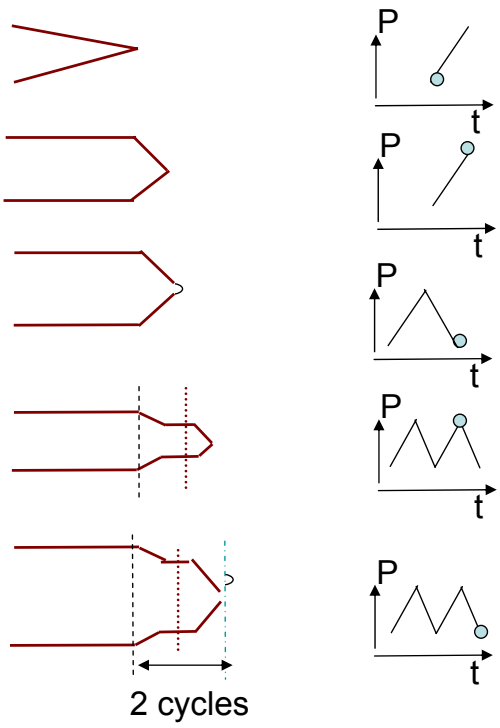
Distribution des déformations

Courbe de fatigue oligocyclique



$$\frac{da}{dN} = \frac{X_{ef}}{N^*}$$

Modèle de Pelloux



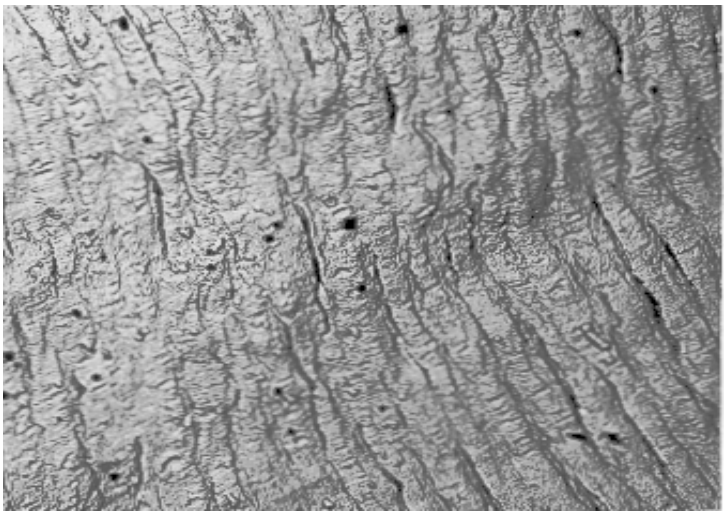
Loi de Pelloux

$$da/dn = i = D\delta^{n}$$

I = interstrie

D et n constantes

Modèle de Pelloux



Le modèle de Pelloux est particulièrement adapté pour une propagation marquée par des stries de fatigue.

Merci de votre attention…

Claude ROBIN
claude.robin@mines-douai.fr