ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

I- INTRODUCTION

La notion d'endommagement ou de dommage présente deux aspects : l'un physique et l'autre descriptif très important du point de vue de l'emploi des matériaux dans les constructions.

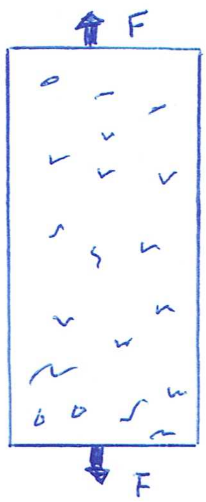
- Aspect physique : c'est un aspect intuitif qui exprime les variations des propriétés physiques du matériau lorsqu'il y'a fatigue, variations reflétant les modifications que subit la matière sous l'action des sollicitations.

- Aspect descriptif : il décrit la représentation quantitative de l'endurance des matériaux soumis à des «histoires de contrainte» plus ou moins variées et à la limite quelconques.

II- THEORIE DE L'ENDOMMAGEMENT

Les premières études représentent l'endommagement d'un point de vue physique comme la création de micro vides ou de microfissures impliquant la détérioration progressive de la cohésion de la matière sous l'action de sollicitations jusqu'à la rupture de l'élément de volume.

La première approche mécanique de l'endommagement remonte à 1958 lorsque Rabtnov et Kachanov ont introduit une variable scalaire D pour exprimer l'endommagement qui s'opère dans un matériau sollicitée par un effort de tension F perpendiculairement à la section droite S.



La section effective S_{eff} est la différence entre la section S et la somme des sections (si) des petits défauts existants, soit :

$$S_{eff} = S - \sum s_i$$

de sorte que la contrainte qui varie en un point de la section S de l'éprouvette endommagée est :

$$\sigma_{eff} = \frac{F}{S_{eff}}$$

La contrainte effective σ_{eff} est donc la contrainte rapportée à la section effective S_{eff}. Kachanov définit D comme la perte de la section résistante

$$D = 1 - \frac{S_{eff}}{S}$$

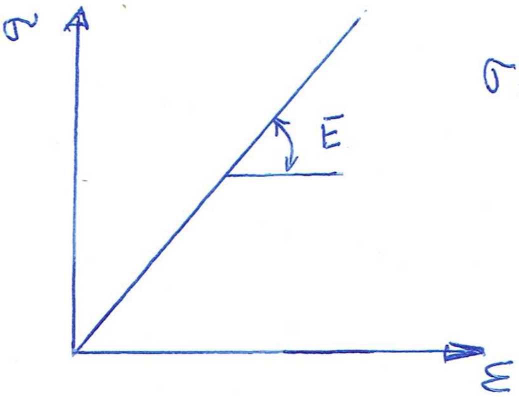
Ce qui donne en utilisant la notion de contrainte effective

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

avec $D = 0$ en l'absence de tout endommagement
$D = 1$ rupture complète de l'élément

L'hypothèse de la contrainte effective implique que toute loi de comportement d'un matériau endommagé s'écrive de la même manière que pour ce matériau saint en remplaçant simplement la contrainte usuelle par la contrainte effective.

Ainsi en élasticité linéaire unidimensionnelle



$$\sigma = E . \varepsilon$$

E : module de Young du matériau saint

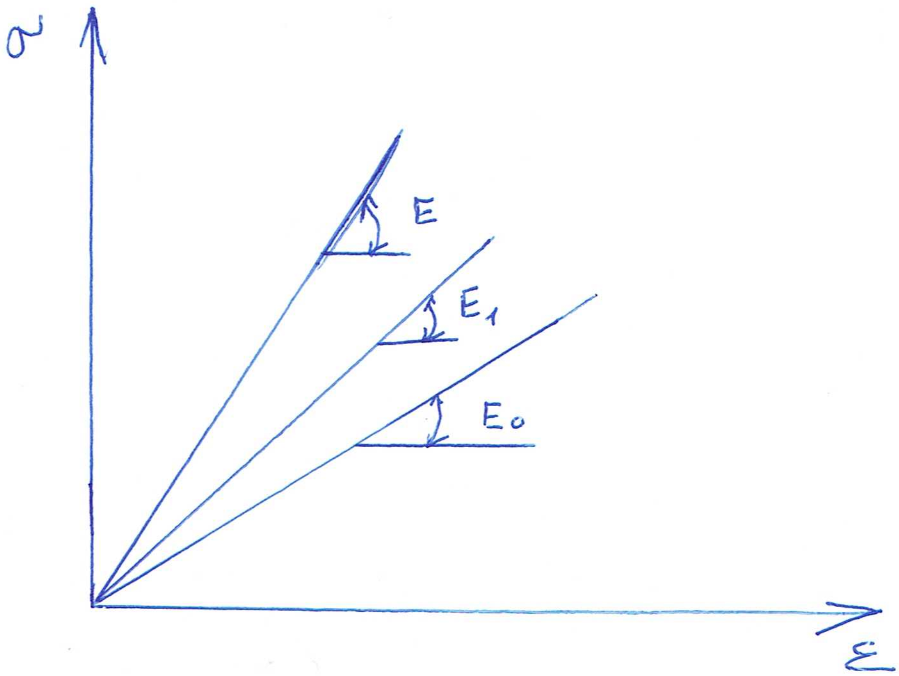
Concernant le matériau endommagé

$$\tilde{\sigma} = E.\varepsilon \Rightarrow \frac{\sigma}{1-D} = E.\varepsilon \Rightarrow \sigma = \underbrace{E.(1-D)}.\varepsilon$$

$$E_0 = E.(1-D)$$

On peut ainsi caractériser l'évolution de l'endommagement au cours du chargement par la mesure de l'évolution du module d'élasticité : $E_0 = E\,(1 - D)$

Le module apparent du matériau diminue.



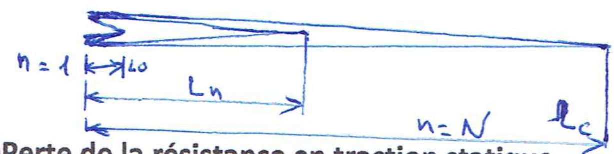
III- DEFINITION DU DOMMAGE

Différentes définitions ont été attribuées à l'endommagement. Ainsi le dommage a souvent été défini comme :

a) Une évolution de la fissuration et une absorption de l'énergie plastique
b) Une perte de la résistance en traction statique
c) Une réduction de la limite d'endurance
d) Un accroissement de la déformation plastique

a)Evolution de la fissuration et une absorption de l'énergie plastique

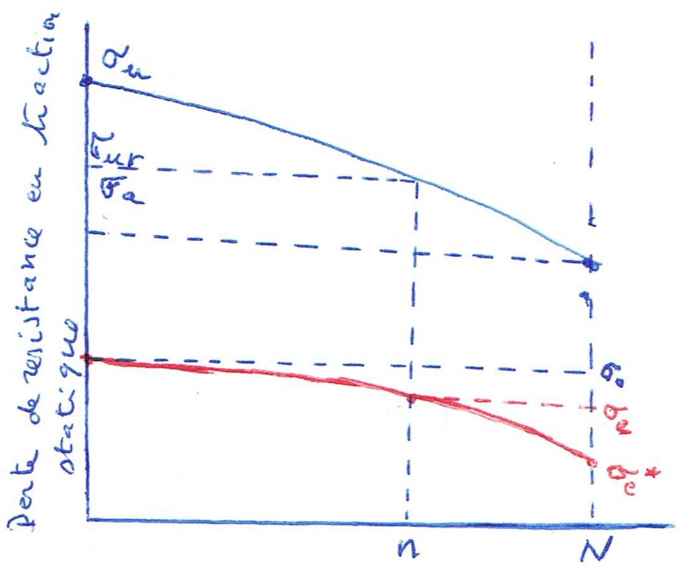
L'extension d'une fissure de longueur L au cours d'un essai de fatigue est caractérisée par sa longueur L_0 correspondant à une fissure microscopique (nombre de cycle n égal à 1). Cette longueur croit au cours de l'accroissement du dommage jusqu'à une valeur critique L_C correspondant à la rupture.



b)Perte de la résistance en traction statique

Matériau vierge ⟶ Résistance σ_u

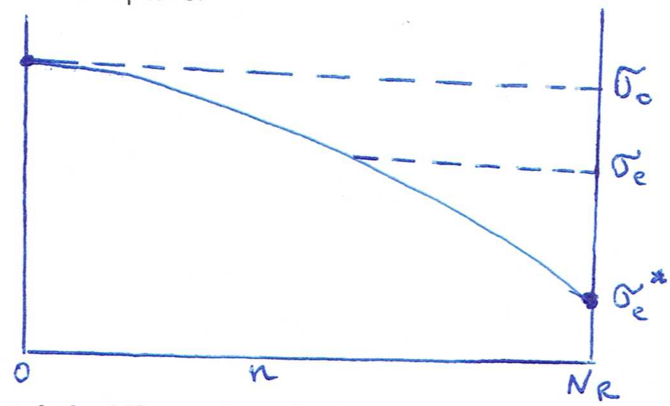
Cette résistance diminue graduellement au fur et à mesure sue le cyclage d'amplitude σ_a augmente jusqu'à rupture. Si on arrête un essai de fatigue avant la rupture finale et on soumet l'échantillon à un essai de traction statique, la rupture se produit à un niveau de contrainte σ_{ur} situé entre σ_u et σ_a.



c)Réduction de la limite d’endurance

Matériau original limite d’endurance T_0

T_0 décroit avec l’augmentation du nombre de cycle appliqué pour prendre finalement la valeur critique à la rupture.

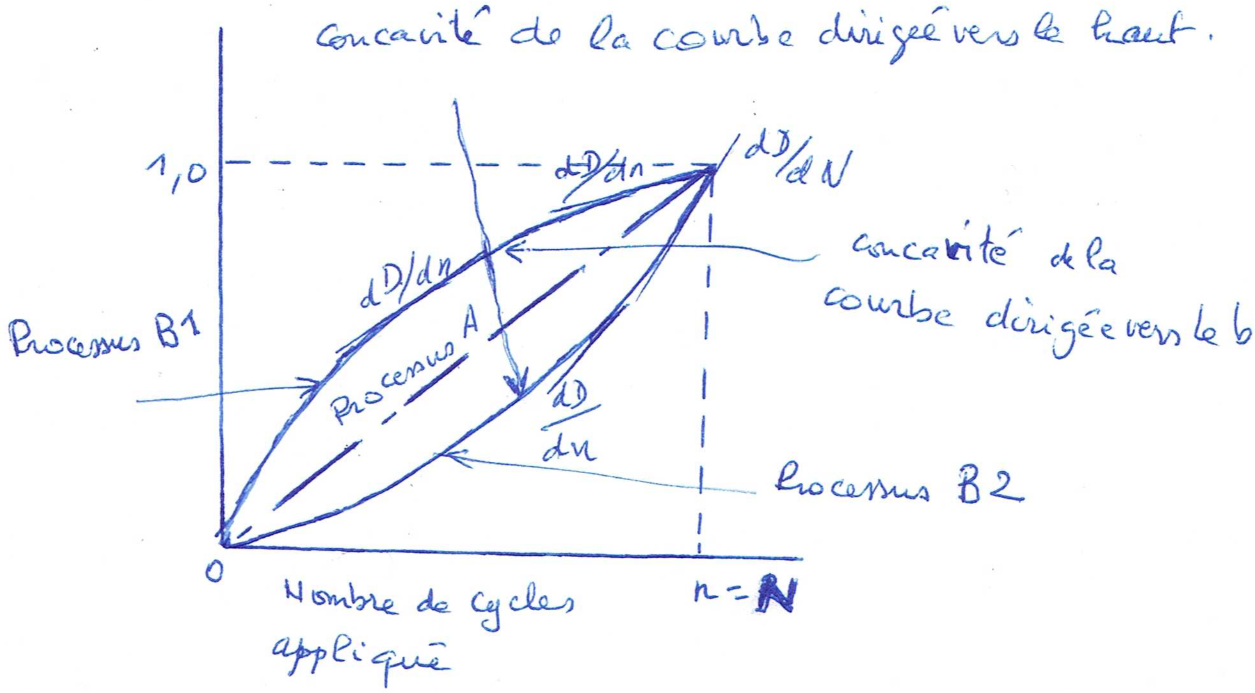


d)Accroissement de la déformation plastique

Sous une charge cyclique élevée, la variation de déformation plastique croit avec l’augmentation du nombre de cycles appliqué pour atteindre à la fin une valeur critique à la rupture.

IV- EVOLUTION DU DOMMAGE

Le processus d’endommagement peut être représenté schématiquement comme indiqué sur la figure ci contre durant lequel le dommage D est nul pour le matériau original et égal à l’unité à la rupture.



Processus A : le dommage augmente linéairement avec le nombre de cycles appliqué.

Processus B1 : accumulation non linéaire du dommage avec n. La concavité de la courbe représentative de D = f(n) est dirigée vers le bas ce qui signifie que le dommage s'accélère cers la fin de la vie du matériau avec une vitesse d'endommagement d(D)/dn qui diminue en s'atténuant.

Processus B2 : accumulation non linéaire du dommage avec n. La concavité de la courbe représentative de D = f(n) est dirigée vers le haut ce qui signifie que le dommage s'accélère cers la fin de la vie du matériau avec une vitesse d'endommagement d(D)/dn qui augmente.

Il n'y'a pas de méthode expérimentale fiable pour vérifier les processus de dommage proposés. Cependant il est possible de prouver la validité d'un processus en vérifiant seulement les conséquences qui en découlent.

V- CUMMULATION DU DOMMAGE : LOI DE MINER

Jusqu'ici il a été considéré des sollicitations se fatigue dans lesquelles on répétait des sollicitations toutes identiques ; l'exemple type étant l'application d'une sollicitation sinusoïdale.

Dans la réalité, ce cas ne se produit pratiquement jamais et l'amplitude des sollicitations est le plus souvent distribuée au hasard. Les expérimentateurs se sont donc intéressés également à ce cas.

L'approche la plus simple et la plus connue est la règle linéaire du dommage proposée par Miner. En supposant qu'une quantité caractéristique du travail absorbé par le matériau soit directement responsable de la détérioration de la résistance du matériau, le dommage sous amplitude constante est exprimé par la relation :

$$D = \frac{n}{N}$$

Soit n le nombre de cycles supporté sous la contrainte d'amplitude σ pout laquelle la durée de vie est N ; N étant le nombre de cycles à rupture sous σ. Le dommage subi par l'éprouvette peut être représenté par n/N sous l'amplitude σ.

Supposant que l'on ait effectué $n_1$cycles sous σ_1 ; n_2 sous σ_2;……………….n_i sous σ_i. Les endommagements subis seront

$$\frac{n_1}{N_1}, \frac{n_2}{N_2} \ldots\ldots\ldots \frac{n_i}{N_i}$$

L'hypothèse la plus simple consiste à admettre que ces endommagements sont cumulatifs, c'est à dire que l'endommagement final est représenté par

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots \frac{n_i}{N_i}$$

Dans ces conditions, la rupture apparaitra pour :

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

C'est la <u>règle de Miner</u>.

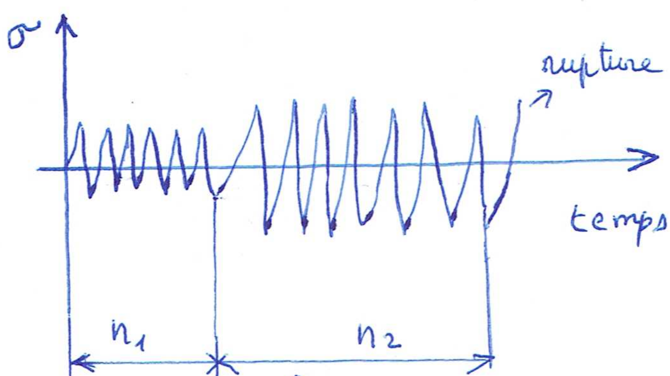
Elle peut s'interpréter de la façon suivante : On appelle dommage résultant de l'application de ni cycles d'une sollicitation périodique d'amplitude S, le rapport n_i/N_i où N_i est la durée de vie pour une amplitude de sollicitation Si. Lorsqu'il y'a rupture par fatigue le dommage est 1. Cette notion purement mathématique ne doit pas être confondue avec la notion d'endommagement définie plus haut, qui a un sens physique.

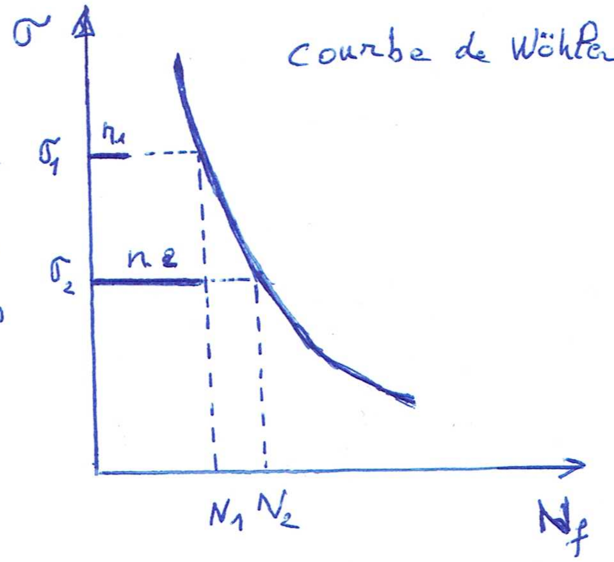
<u>Application de la loi de Miner</u>

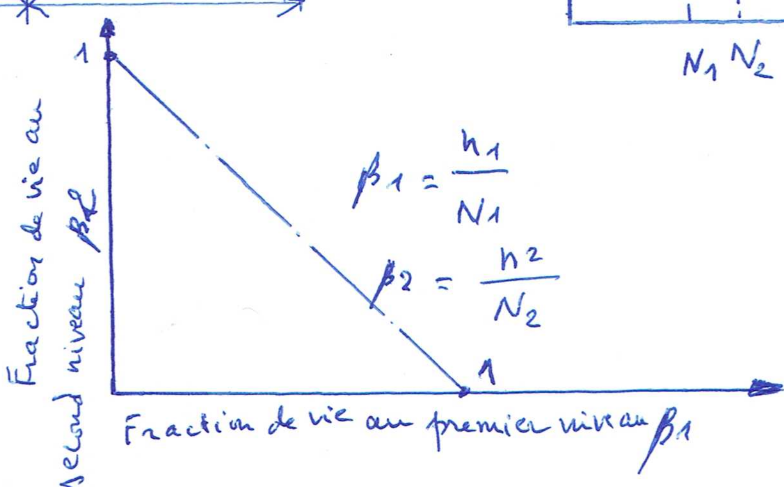
Supposons que le matériau soit soumis à n_1 cycles au premier niveau, puis que le chargement soit changé au second niveau jusqu'à la rupture. Les vies correspondantes aux deux niveaux sont N_1 et N_2 respectivement. D'après la règle linéaire de Miner, la vie prévue au deuxième niveau de chargement est donnée par :

$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - \frac{n_1}{N_1}$$

La procédure est illustrée comme suit







L'application de cette règle au cas de plusieurs niveaux de chargement permet de prédire la vie résiduelle au dernier niveau k, comme suit :

$$N_k = N_k \left(1 - \sum_{i}^{k-1} \frac{n_i}{N_i}\right)$$

Lacunes de la règle de Miner

De nombreux résultats expérimentaux montrent que cette loi d'additivité des dommages n'est pas exacte. Dans le travail optimal de Miner par exemple, la valeur du rapport trouvée expérimentalement variait entre 0,61 et 1,45.

D'après Miner il n'est fait aucune distinction suivant que T est supérieure à T. Or l'ordre d'application des niveaux de chargement est un facteur important dans la sommation des fractions de vie. Si on commence par appliquer le niveau de contrainte le plus élevé, la durée de vie totale est en général plus faible que si on applique d'abord le niveau de contrainte le plus faible. L'inverse se produit dans le cas contraire.

(i) Pout les niveaux décroissants : $\sum \frac{n_i}{N_i} < 1$

(ii) Pour les niveaux croissants : $\sum \frac{n_i}{N_i} > 1$

Malgré ces limitations, on utilise très souvent la loi d'additivité des dommages de Miner , qui a le mérite de la simplicité.