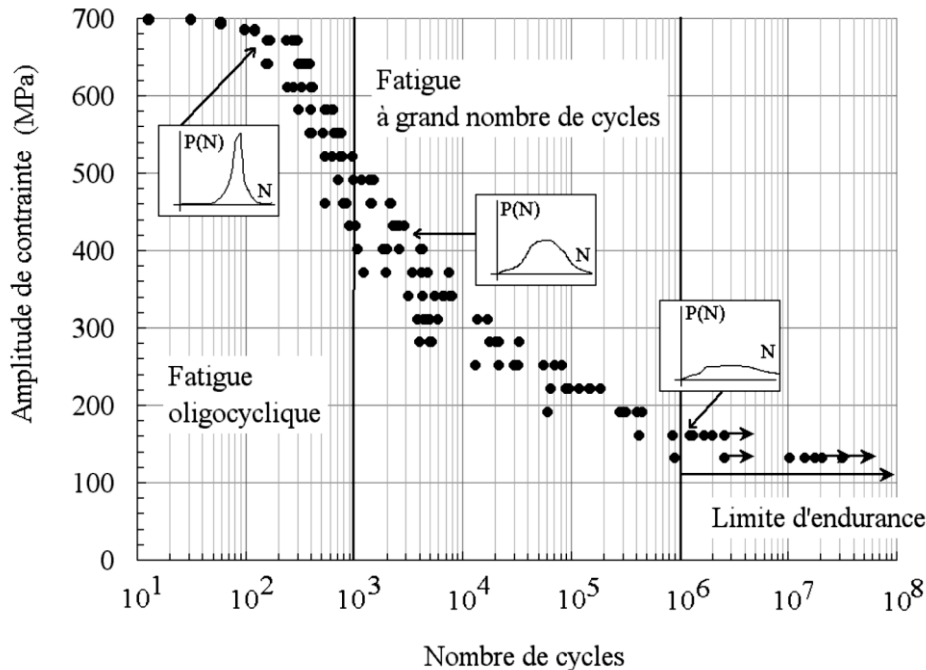


CHAP.4. FATIGUE OLIGOCYCLIQUE

1. Introduction :

Il existe trois domaines principaux pour les mécanismes de rupture par fatigue, qu'on distingue sur une courbe de Wöhler, le domaine de la fatigue oligocyclique ou fatigue plastique (à faible nombre de cycles), le domaine de la fatigue à grand nombre de cycles et le domaine de l'endurance.



La durée de vie la plus courte possible sur la courbe de Wöhler est égale à $\frac{1}{4}$ de cycle et est obtenue lorsque la contrainte appliquée est la contrainte maximale du matériau. Lorsque les contraintes appliquées diminuent, le matériau est sollicité en plasticité et peut endurer un nombre de cycles de fatigue qui dépend de l'amplitude de la déformation plastique qui lui est imposée à chaque cycle. Dans ce régime, dit de *la fatigue oligocyclique*, la durée de vie en fatigue est fortement dépendante du comportement plastique cyclique du matériau.

2. Notions d'adaptation, d'accommodation et de déformation progressive :

Dans le domaine de la fatigue oligocyclique, on distingue encore trois comportements pour le matériau lorsqu'on applique des cycles de traction-compression à force imposée sur une éprouvette, l'adaptation, l'accommodation et le rochet.

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.

Accommodation : 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.

Rochet : 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.

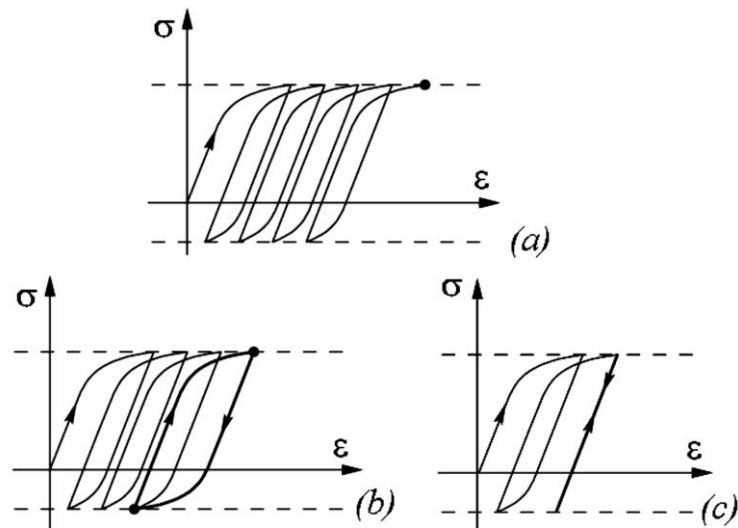


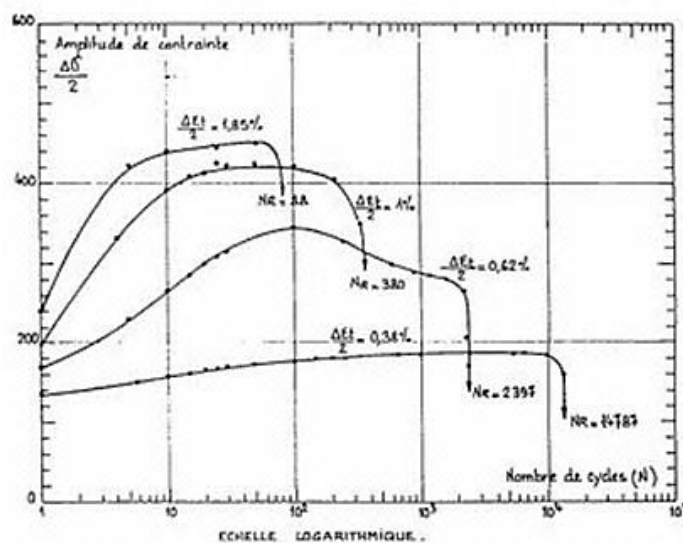
Fig. Illustration des phénomènes (a) de rochet, (b) d'accommodation et (c) d'adaptation

3. Comportement cyclique des matériaux :

3.1. Ecrouissage cyclique :

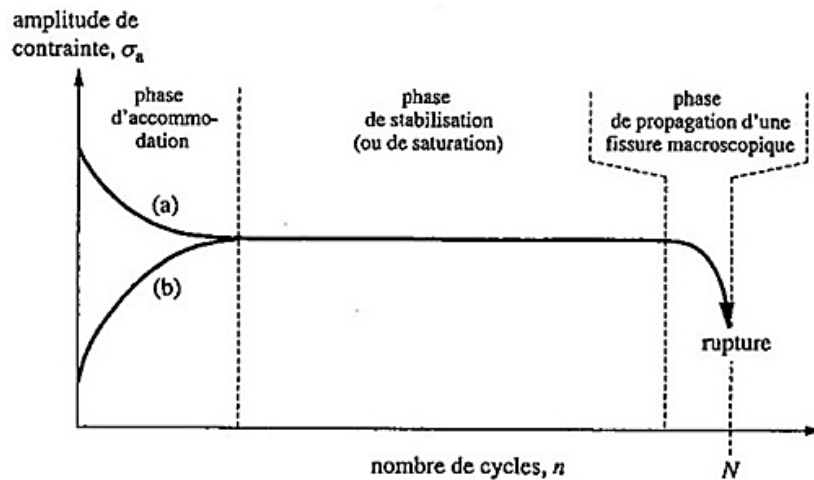
Lors d'un essai de fatigue oligocyclique, quand l'éprouvette est soumise à une déformation cyclique imposée, on constate que les contraintes maximales et minimales ne restent que rarement constantes pendant tout l'essai. On distingue généralement trois stades :

- stade transitoire : où les contraintes varient très sensiblement ; elles augmentent fortement au cours des 10 voire 100 premiers cycles et ceci d'autant plus que l'amplitude de déformation imposée est importante. Dans le cas d'autres matériaux, on peut observer une décroissance de la contrainte à chaque cycle de chargement.
- stade de stabilisation : le niveau de l'amplitude de contrainte ne varie pas d'un cycle à l'autre.
- stade de fissuration : on observe une chute des contraintes souvent associée à l'apparition de fissures.



Evolution de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles appliqué lors d'un essai de fatigue oligocyclique,

Dans le cas où le matériau se **durcit**, on parle de **consolidation**. Inversement Lorsque le matériau **s'adoucit**, il s'agit de **déconsolidation**. Schématiquement on représente les courbes d'évolution de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles appliqués



Courbes schématiques de durcissement ou adoucissement cycliques.

4. Essais monotone (traction monotone) :

Considérons un essai de traction standard dans lequel une éprouvette métallique de section transversale constante est soumise à une force de traction augmentant de façon monotone. Voir la figure, Pendant l'essai, la force changeante et l'allongement sont observés et enregistrés pour le calcul des contraintes et des déformations.

$$\sigma = P / A_0$$

$$e = (l - l_0) / l_0$$

Où P : la charge et

A_0 : l'aire de la section transversale initiale

l_0 : la longueur initiale,

l : la longueur sous charge P ,

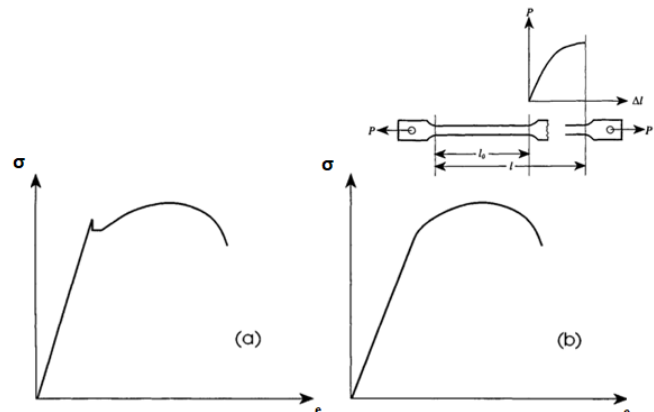


Figure : courbes σ - ϵ en traction pour 2 aciers différents.

Sous un chargement monotone croissant, l'éprouvette subit d'abord une déformation élastique qui est réversible et, au-delà de la limite d'élasticité, une déformation plastique a lieu laissant une déformation permanente. Figure ci-après.

Le point P **limite proportionnelle (Re)**: jusqu'à ce point la corrélation contrainte-déformation est **linéaire**. Si la charge est supprimée avant d'atteindre le point P , l'éprouvette ne subit aucun changement de géométrie. Ce point P est suivi du seuil d'élasticité Y (**yield point**)

Au-delà du point Y, une **déformation plastique** se produit. Pour les aciers, il est courant de placer le point Y à un décalage de **0,2%P** (comme indiqué sur la figure). Il convient de noter que dans les applications de conception, le point P est supposé coïncider avec le point Y, comme si la corrélation de contrainte-déformation est linéaire partout.

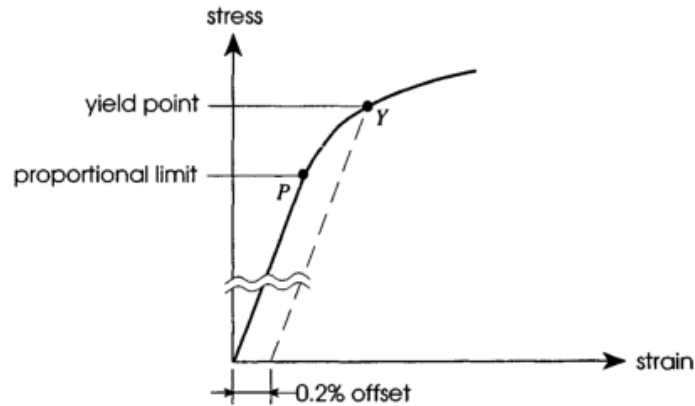


Figure : Définition de la limite proportionnelle et de la limite d'élasticité appliquée à l'acier à haute teneur en carbone.

Contrainte et déformation Réelles:

Dans le domaine élastique, la contrainte et la déformation sont définies par les équations précédentes de σ et e , et sont applicables pour des charges plus faibles. Au-delà de P, une fois la déformation plastique présente, Lorsque la charge P augmente, la section transversale A diminue. En règle générale, le volume de l'échantillon pendant le domaine plastique est supposé constant, il faut une définition plus fonctionnelle qui Améliore la précision des Équations.

σ_{rel} par rapport à σ donne:
$$\sigma_{rel} = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma(1 + e)$$

Remarque: dans la plage élastique, où e est très petit, $(1+e)$ dans l'équation ci-dessus approche 1 et donc σ approche σ_{rel} .

Introduisons la déformation réelle, présentée d'abord sous sa forme différentielle : $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$

L'intégration est égale :
$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + e)$$

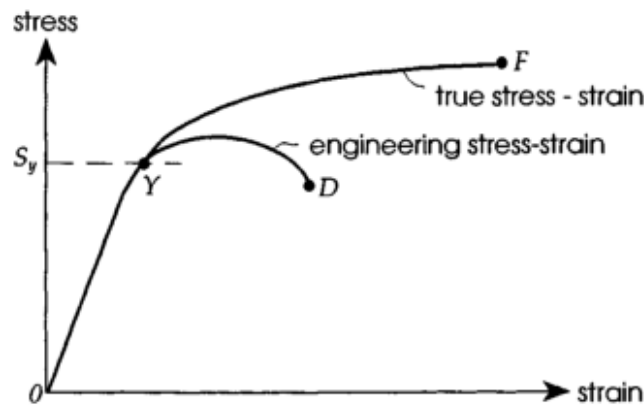


Figure : Comparaison de la courbe contrainte-déformation et courbe contrainte-déformation réelle pour un acier à haute teneur en carbone.

Dans l'essai monotone, le comportement de contrainte-déformation jusqu'à la limite élastique suit la loi de Hooke de la théorie de l'élasticité $\sigma = E\varepsilon$

Dans le domaine plastique au-delà de la limite d'élasticité, la vraie relation contrainte-déformation est exprimée par la corrélation de Hollomon : $\sigma = K\varepsilon^n$

où K est un coefficient de résistance et n un exposant d'écrouissage.

Au point A, la déformation totale comprend deux composantes, une déformation élastique et une déformation plastique. Ceci est exprimé par : $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$

La déformation plastique ε_p correspond à une déformation permanente qui subsiste après le déchargement de l'éprouvette et la contrainte est nulle. Les composants élastiques et plastiques sont définis comme suit :

- La définition de l'élastique la déformation se découle de l'équation, $\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$
- La définition de la déformation plastique ε_p est dérivée de l'équation ($\sigma = K\varepsilon^n$).

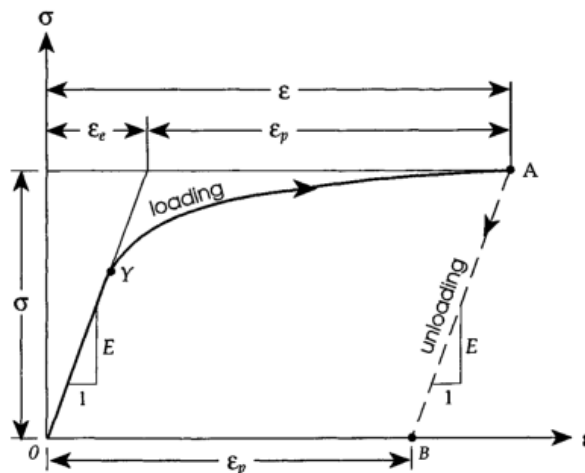


Figure : Chemin de chargement au-delà de la limite d'élasticité dans l'essai monotone

Cette corrélation est basée sur les données expérimentales d'Hollomon, (déformations de 0,01 à 0,6), la différence entre la déformation totale et la déformation plastique sont négligeable. Par conséquent, on peut exprimer ε_p avec une précision suffisante en utilisant l'équation suivante :

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Ainsi, la déformation totale ε peut être exprimée sous la forme : $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$

5. Essais cycliques:

Un état de fatigue sous un chargement cyclique suppose que les essais de fatigue sont à cycle bas, où le comportement d'une éprouvette chargée cycliquement est surveillé nécessitant une machinerie d'essai et un équipement de contrôle compliqués,

Dans le cas de la fatigue cycliques, on distingue deux types d'essais ;

- Les essais avec contrôle de contrainte (à **contrainte imposée**) ont les données de fluctuation de contrainte prescrites stockées dans la mémoire de l'ordinateur
- les essais avec contrôle de déformation (à **déformation imposée**), ont les données de déformation stockées.

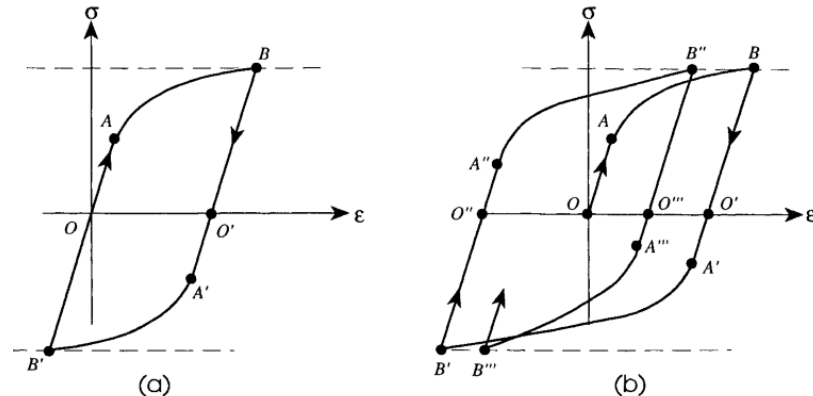


Figure : Courbes de contrainte-déformation cycliques pour (a) le cycle de déformation n'affecte pas les propriétés du matériau et (b) tenant compte de la réponse du matériau due à l'effet **Bauschinger** et au **durcissement** par cycle de déformation.

5.1. Essai monotone à contrainte imposée : Figure (a),

L'échantillon en métal ayant des propriétés qui restent constantes sous un cycle de charge. L'éprouvette est soumise à un chargement complètement inversé, une tension-compression symétrique au-delà de la limite d'élasticité, se succédant l'un après l'autre.

Le chargement commence par la tension au point O ;

- OA, la déformation est élastique et est représentée par une droite.
- Au-delà du point A (limite élastique en traction), la déformation est plastique, comme en témoigne la courbe AB.
- Au-delà du point B, le tournant, il suit le déchargement, comme indiqué par BO'. Puisqu'il est supposé qu'aucun changement dans les propriétés du métal n'a lieu, le chargement inverse (compression) suivant a un modèle égal mais symétriquement opposé.
- De O' à A' la déformation est à nouveau élastique et de A' à B' elle est plastique.
- Le point B' est à nouveau un point de retournement, après quoi le déchargement nous ramène au point d'origine O.

Ce schéma se poursuit, résultant en une boucle d'hystérésis stable.

5.2. Essai cyclique à contrainte imposée : la figure (b),

Dans la réalité, les métaux réagissent au chargement cyclique avec des **changements d'écrouissage** ou de **ramollissement** sous contrainte (connu sous le nom de **cycle de durcissement** ou de **cycle de ramollissement**). Le processus montre des boucles d'hystérésis en constante évolution, à partir du premier chargement inversé (compression), le processus est différent de celui illustré à la figure (a), comme le montre le chemin **O'A'B'**. Le motif modifié continue avec un autre déchargement **B'O''**, après quoi l'échantillon est à nouveau rechargé, comme indiqué par **O''A''B''**, et ainsi de suite.

Le chemin de chargement de départ, **OAB**, et le premier chemin de chargement inversé, **O'A'B'**, ne sont pas symétriques: la limite d'élasticité **A'** est inférieure à la limite d'élasticité **A**. Ceci est connu sous le nom **d'effet Bauschinger**. Le processus de cyclage produit un écrouissage par contrainte évident dans les positions changeantes des points de retournement **B, B', B''**, et ainsi de suite. Alors que le durcissement cyclique prévaut, l'effet Bauschinger diminue.

Pour montrer les deux réponses au chargement cyclique, au cycle de durcissement et au cycle de ramollissement, nous décrivons le comportement dans les essais contrôlés de contrainte de deux échantillons de métaux différents. Voir la figure.

Pour les deux échantillons, la contrainte σ a une amplitude constante prescrite. La partie (a) de la figure reflète le comportement d'une réponse **d'écrouissage cyclique** indiqué par le fait que la déformation ε suit avec une amplitude décroissante

asymptotiquement. Après un grand nombre de cycles un état stable est obtenu comme le montre la figure par la boucle d'hystérésis stabilisée.

La partie (b) de la figure montre une réponse de **ramollissement cyclique**. Par contre, ici la déformation ϵ suit avec une amplitude asymptotiquement croissante, atteignant à la fin une boucle d'hystérésis finale.

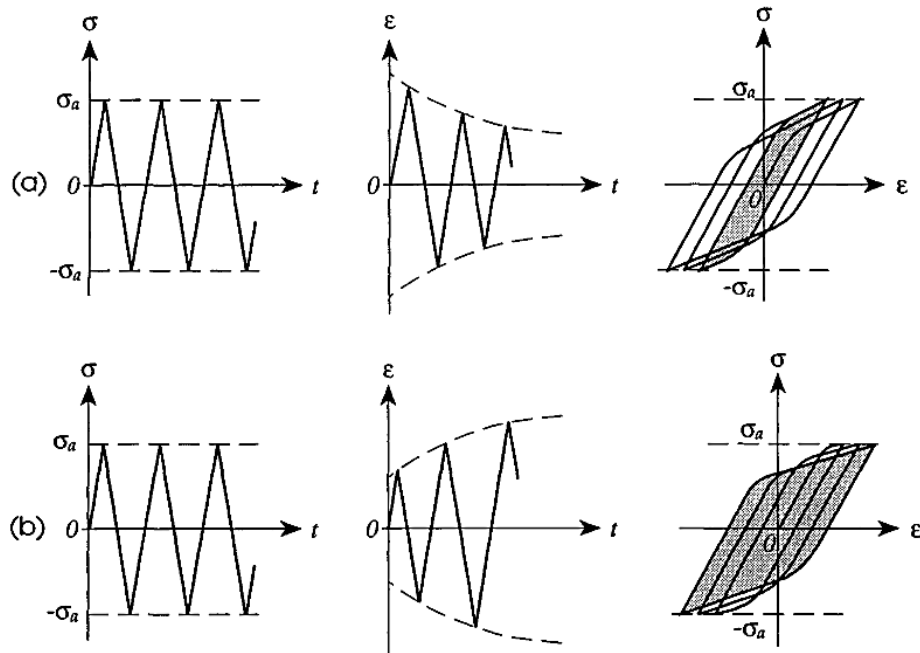


Figure : Contrainte en fonction de la déformation dans un essai a **contrainte contrôlée** (imposée) pour : (a) une éprouvette en durcissement par cycle et (b) une éprouvette en ramollissement par cycle.

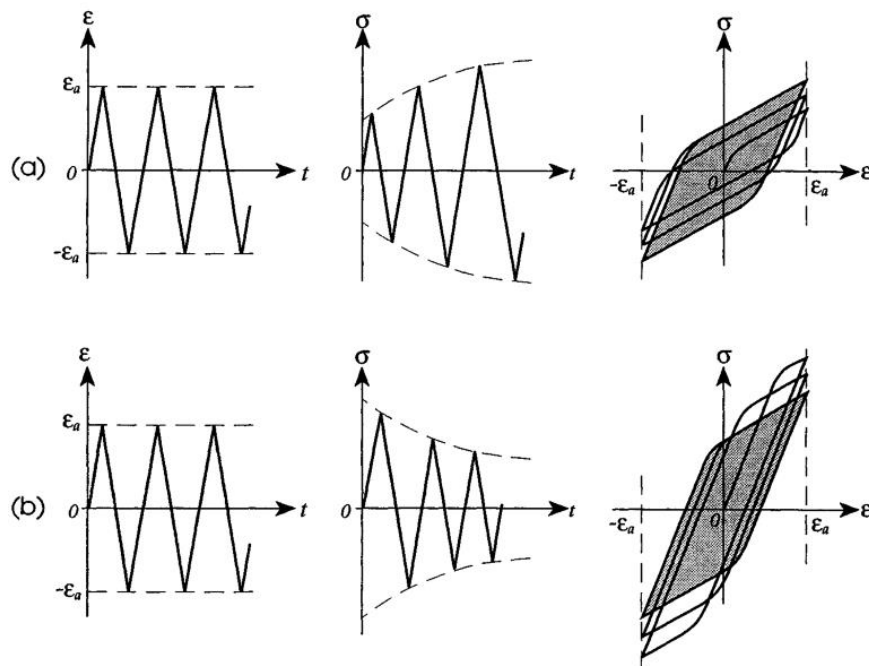


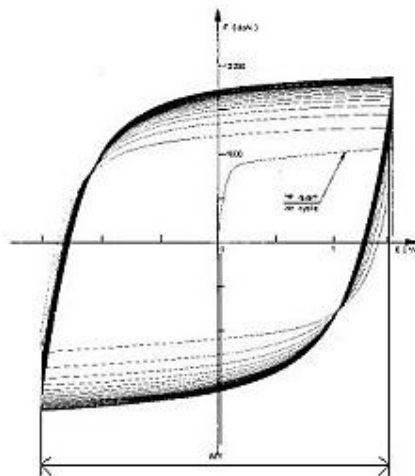
Figure : contrainte versus déformation dans un essai a déformation contrôlé pour une: (a) éprouvette en durcissement cyclique et (b) éprouvette en adoucissant par cycle.

On observe des phénomènes équivalents dans les essais contrôlés en déformation (**déformation imposée**). Décrivons à nouveau deux réponses où la déformation ε a une amplitude constante prescrite. Voir la figure. La partie (a) de la figure montre une réponse de durcissement de cycle où la contrainte σ suit avec une augmentation en l'amplitude jusqu'à atteindre la boucle d'hystérésis stable. La partie (b) de la figure montre une réponse de ramollissement du cycle où l'amplitude de la contrainte diminue vers la boucle d'hystérésis.

5.3. Courbe contrainte-déformation

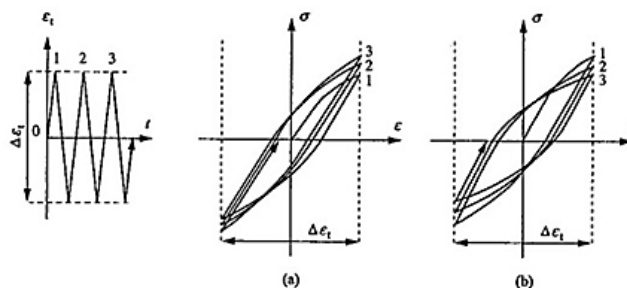
L'enregistrement de l'effort ou la contrainte en fonction de la déformation. Permet de déterminer la réponse du matériau qui est caractérisée par ***l'évolution des boucles d'hystérésis*** contrainte-déformation au cours du cyclage.

On obtient des boucles qui évoluent et se stabilisent dans le cas où un régime stable existe, on voit bien que la contrainte évolue fortement au cours des premiers cycles.



Courbes contrainte - déformation pour un acier inoxydable 316

L'évolution des boucles d'hystérésis quand il y a consolidation (adoucissement).

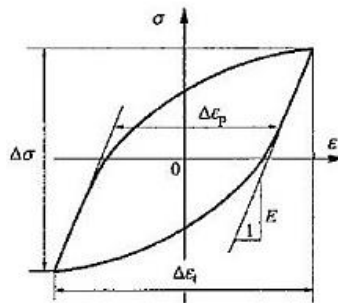


Boucles d'hystérésis contrainte - déformation

Les étendues de variation de la contrainte $\Delta\sigma$, et des déformations totale $\Delta\epsilon$, plastique $\Delta\epsilon_p$ et élastique $\Delta\epsilon_{el}$ sont repérées sur la figure suivante.

On peut écrire :

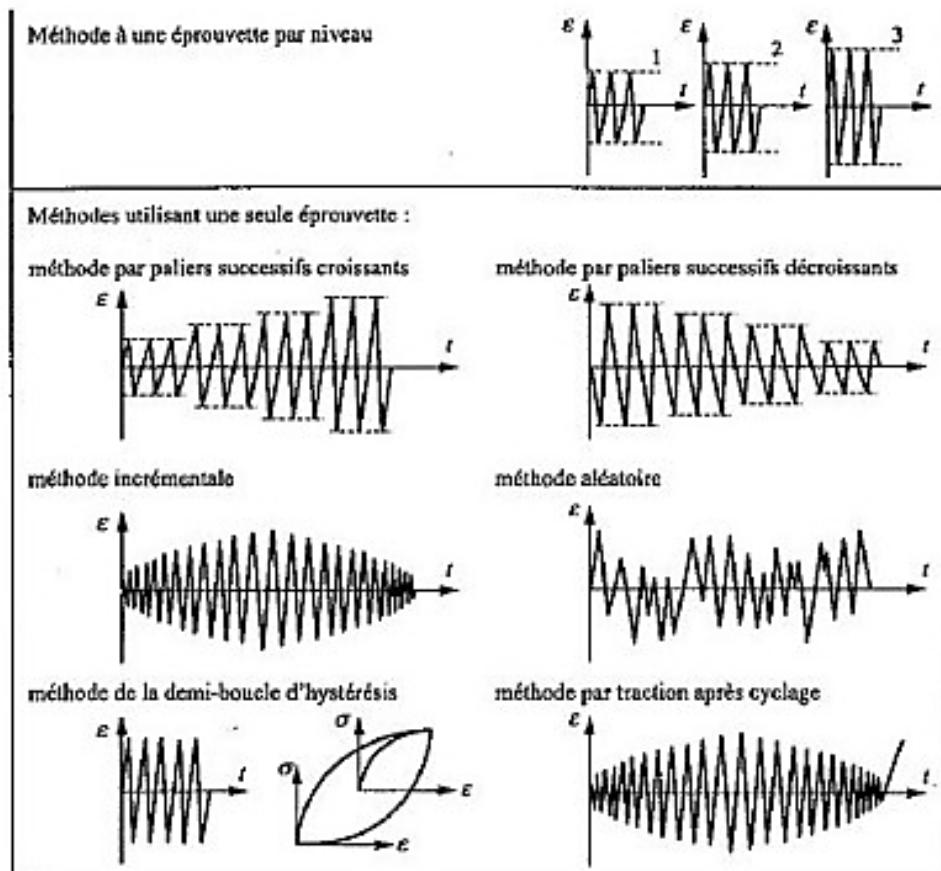
$$\begin{aligned}\Delta\epsilon &= \Delta\epsilon_{el} + \Delta\epsilon_p = \\ &= (\Delta\sigma/E) + \Delta\epsilon_p\end{aligned}$$



Boucle d'hystérésis stabilisée

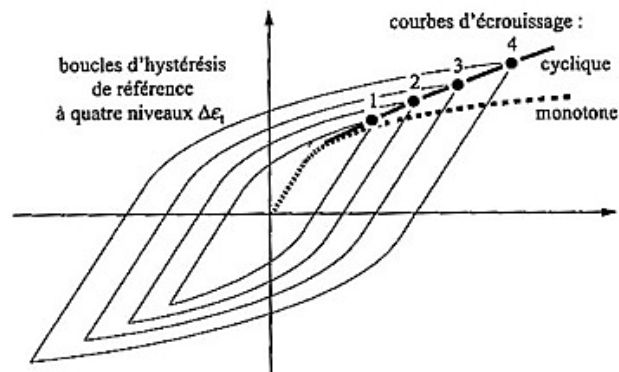
3.3.- méthodes utilisant courbes contrainte – déformation

L'enregistrement des courbes contrainte – déformation permet de déterminer la courbe d'écrouissage cyclique. Cette courbe est l'équivalent d'une courbe de traction monotone qui serait déterminée à l'aide d'un chargement cyclique, mais cette courbe ne peut être déterminée avec une seule éprouvette. On effectue n essais avec n éprouvette. Pour chaque éprouvette, on impose une déformation donnée et on mesure la contrainte, une fois stabilisée, on obtient des courbes comme sur la figure suivante.



Différentes méthodes d'obtention de la courbe d'écrouissage cyclique

On utilise alors les courbes d'hystérésis tracées au cycle stabilisé pour chaque niveau de déformation.



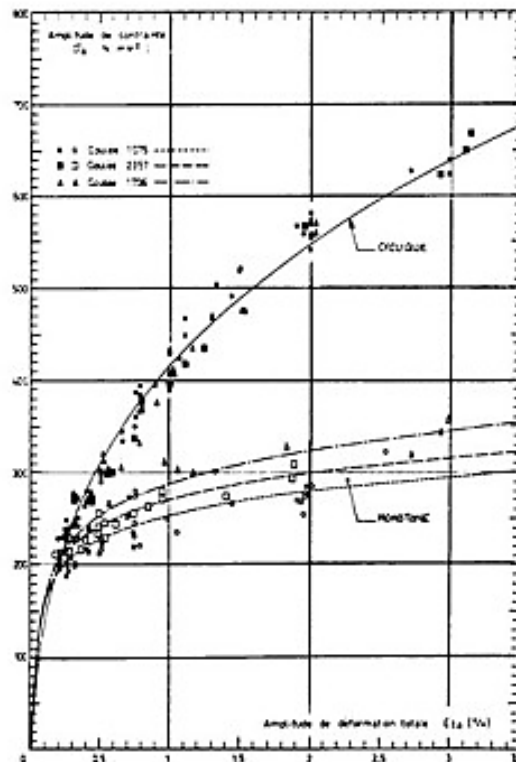
Courbe de consolidation cyclique obtenue à par la méthode à une éprouvette par niveau pour un matériau durcissant cycliquement

En pratique, on prend 1 ou 2 éprouvettes :

- à partir d'une éprouvette en commençant par une amplitude de déformation faible, en attendant la stabilisation, puis en choisissant un niveau de déformation supérieur.
- par des sollicitations par blocs d'amplitudes de déformations linéairement croissants puis décroissants.

Dépouillement des résultats :

Utilisation d'une loi puissance (par analogie avec une loi de courbe de traction classique). Sur un diagramme logarithmique, on reporte la contrainte rationnelle en fonction de la déformation vraie.



Courbe d'écrouissage cyclique pour l'acier 316.

Loi de Manson –Coffin :

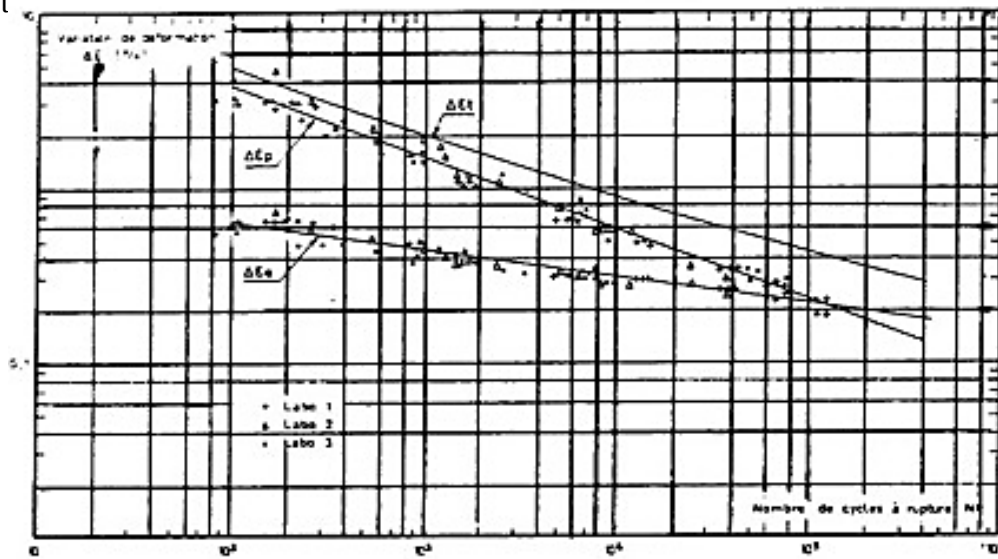
Courbes de résistance à la fatigue (courbes de Manson-Coffin). Ce sont les courbes qui indiquent la déformation en fonction du nombre de cycles à rupture (comme les courbes de WÖHLER le sont à contrainte donnée).

* Loi de Basquin : cette loi relie l'amplitude de déformation élastique au nombre de cycles à rupture à l'aide de la relation suivante :

$$(\Delta\epsilon_{el}/2) = (\sigma_f/E) \cdot (2N_R)^b$$

* Loi de Manson-Coffin : cette loi relie l'amplitude de déformation plastique au nombre de cycles à rupture ; elle s'écrit : $(\Delta\epsilon_p/2) = \epsilon' \cdot (2N_R)^c$

* Loi t



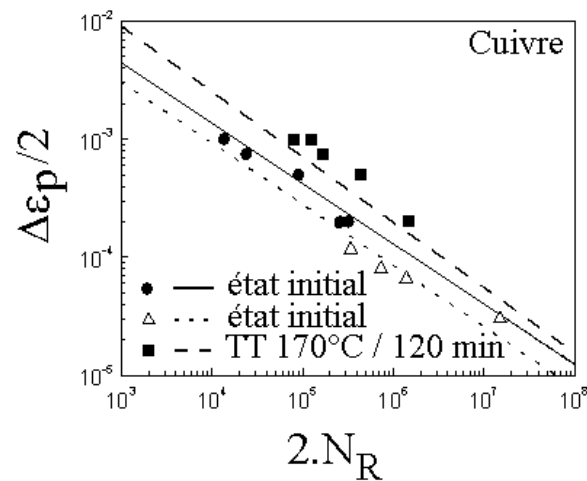
Loi de Manson coffin

Si lorsqu'on applique des cycles de contrainte à une éprouvette la déformation plastique de l'éprouvette augmente progressivement à chaque cycle, on parle alors de rochet. Le critère de rupture est généralement de comparer la déformation de rochet à la déformation plastique répartie maximale admissible par le matériau.

Si au contraire les cycles se stabilisent, on parle alors d'accommodation. On peut dans ce cas relier le nombre de cycles à rupture à la **demi-amplitude** de la déformation plastique à chaque cycle.

On observe que les résultats expérimentaux s'alignent sur une droite dans un diagramme bilogarithmique, ainsi on peut généralement écrire la loi dite de Manson –Coffin dans le régime de fatigue oligocyclique :

$$N_R = A(\Delta\epsilon_p)^n$$



Loi de Manson coffin : Résultats d'un essai de Manson-Coffin sur du cuivre pur, à l'état écroui et après un traitement thermique. La demi-amplitude $\Delta \epsilon_p / 2$ de la déformation plastique au cours d'un cycle est tracée en fonction du nombre de cycle à rupture N_R .

Si enfin au bout de quelques cycles, du fait de l'écrouissage, le comportement du matériau devient élastique, on parle alors d'adaptation. Dans ce cas on se retrouve alors dans le régime de la fatigue à grand nombre de cycles.