

Limite de validité des règles de cumul (linéaire et non linéaire) en fatigue et proposition d'une règle de cumul intégrant l'effet de préchargement.

Said Taheri

LaMSID, UMR EDF-CNRS 2832
Département AMA
Électricité de France R&D, Clamart, France 92141

Résumé : le cumul linéaire et non linéaire ainsi que l'effet de séquence sont analysés. On montre l'acceptabilité d'un cumul linéaire pour les matériaux à courbe cyclique unique. Pour les matériaux avec courbe cyclique dépendant de l'histoire du chargement on propose de combiner la règle linéaire avec l'effet du pré-chargement sur la courbe cyclique. On montre que les effets en contrainte contrôlée et en déformation contrôlée sont opposés et que la séquence grand-petit réduit la durée de vie en déformation contrôlée mais l'augmente en contrainte contrôlée, ce qui est en opposition avec les règles du cumul non linéaire n'utilisant pas le comportement élastoplastique. L'analyse précédente est étendue au cas des chargements en amplitude variable, on montre que dans le cas d'un chargement par bloc la règle de Miner peut être conservative en contrainte contrôlée mais non conservative en déformation contrôlée.

1 INTRODUCTION

La problématique de fatigue dans les centrales EDF se pose souvent sous forme de fatigue sous chargement à amplitude variable. La règle la plus utilisée pour le cumul de dommages de fatigue sous un chargement cyclique en amplitude variable est constituée généralement d'un comptage rainflow et d'un cumul linéaire (règle de Miner). La règle de Miner ne peut pas tenir compte de l'effet de séquence : « un petit cycle suivi d'un grand cycle ne crée pas le même dommage qu'un grand cycle suivi d'un petit cycle ». Depuis plus de 50 ans on a essayé de mettre au point des méthodologies de cumul non linéaire de dommage pour la prise en compte de l'effet de séquence avec des tentatives d'extensions au cas multiaxial et amplitude variable. Un travail de synthèse montre que la règle de Miner reste la plus robuste [1] malgré son défaut principal : absence de l'effet de séquence.

Sous chargement cyclique, on peut expliquer l'endommagement par la création de lacunes obtenues par l'annihilation des dislocations, créées elles mêmes par la plasticité. La coalescence de ces lacunes crée des micro-vides et puis micro-fissuration pour arriver à la ruine par une fissure macroscopique. Mais la définition même d'une variable mécanique d'endommagement pose un problème difficile dans la mesure où en absence de fissure macroscopique, souvent rien ne distingue un élément de volume fortement endommagé d'un élément de volume vierge. On est donc obligé d'imaginer une variable interne représentative de l'état de détérioration de la matière. En liaison avec les cavités on définit la notion de la contrainte efficace [2]. Dans cette théorie l'endommagement est mesuré à partir de la variation du module de Young c'est à dire : $D(n) = 1 - E(\text{endommagé}) / E(\text{initial})$ avec donc $D(0) = 0$ et $D(N_f) = 1$ avec N_f nombre de cycle à la fatigue, $D(n)$ étant strictement croissante. La figure 1a [2] montre $D(n/N_f(\Delta\epsilon/2))$ pour différentes amplitudes de chargement. On note sur la figure 1a que le dommage est nul en dessous de 50% de la durée de vie et celui-ci atteint plus de 80% pour un faible chargement. Ainsi cette définition n'est acceptable qu'en présence de fissures, puisque l'endommagement est présent dès le début du chargement par l'annihilation des dislocations.

En ce qui concerne le cumul on peut commencer par la *définition* du cumul linéaire :

cumul linéaire (sous chargement périodique) $\Leftrightarrow$ quelque soit l'état du dommage une même variation du nombre de cycles crée toujours la même variation du dommage.

En conséquence :

Cumul linéaire $\Leftrightarrow$ dommage est une fonction linéaire du nombre de cycle (n/N_f)

Cumul linéaire $\Rightarrow$ absence de l'effet de séquence (en dommage)

Présence de l'effet de séquence $\Rightarrow$ cumul non linéaire

Par contre :

Cumul non linéaire $\neq$ l'existence de l'effet de séquence (en dommage)

Ce dernier propriété se produit si les trois courbes de la figure 1a sont superposées. Un exemple de ce cas est la propagation en 2D-Plane d'une fissure sans seuil de propagation.

Prenons une loi de Paris normalisée sans seuil dans la situation 2D : $dl/dn = (\Delta K)^\alpha$ avec $\alpha = 4$ et $\Delta K = \sigma_a \sqrt{l}$ pour une éprouvette CT, où σ_a représente l'amplitude du chargement à l'infinie. La loi de Paris s'écrit aussi de la façon suivante : $dl/l^2 = (\sigma_a)^4 dn = (\sigma_a)^4 dn$ après l'intégration on obtient $1/l_0 - 1/l = (\sigma_a)^4 n$.

Si on définit la variable de dommage sous la forme $D(n) = (1/l_0 - 1/l)/(1/l_0 - 1/l_c)$ où l_0 est la longueur initiale de la fissure et l_c correspondant à la durée de vie N_f (l_c par exemple la demi-épaisseur d'un tube), on trouve :

$$1/l_0 - 1/l_c = (\sigma_a)^4 n_f$$

En divisant les deux membres des deux précédentes expressions on trouve :

$$D = (1/l_0 - 1/l)/(1/l_0 - 1/l_c) = n/N_f(\sigma_a)$$

On peut donc faire un cumul linéaire de cette variable de dommage. Prenons une autre variable de dommage :

$$(l - l_0)/(l_c - l_0)$$

qui représente la variation normalisée de la longueur de fissure. On a :

$$(l - l_0)/(l_c - l_0) = \frac{n/n_f}{A - B * n/n_f} \quad \text{avec} \quad A = l_c / l_0 \quad \text{et} \quad B = (l_c - l_0)/l_0$$

Le dommage est non linéaire mais il n'y a pas d'effet de séquence. En effet, en présence d'un chargement à deux niveaux : n_1 cycle d'amplitude σ_{a1} avec une propagation jusqu'à l_1 et puis n_2 cycles d'amplitude σ_{a2} avec une propagation jusqu'à l_2 . On trouve :

$$l_2 = \frac{1}{\frac{1}{l_0} - (\sigma_{a1}^4)n_1 - (\sigma_{a2}^4)n_2}$$

C'est une relation symétrique par rapport aux deux chargements, il n'y a donc pas d'effet de séquence sur la longueur de fissure. En fait ceci est lié à la forme de l'équation différentielle décrivant la loi de Paris qui est à variable séparable [2]. On constate que la variation totale normalisée de la longueur de la fissure ne se cumule pas linéairement, tandis que la variation totale normalisée de l'inverse de la longueur accepte un cumul linéaire. Dans les deux cas il n'y a pas d'effet de séquence. La variable $1/l$ ressemble à une rigidité. On peut donc expliquer que la nature quasi bilinéaire des courbes de dommage en fonction du nombre de cycles séparant l'amorçage et la propagation, données dans la littérature est liée en partie à la variable de dommage choisie, c'est à dire la rigidité au travers la contrainte efficace [2].

Si on considère une loi de Paris avec un seuil de non propagation, l'équation différentielle n'est pas à variable séparable il existe alors un effet de séquence. *En conclusion* le cumul linéaire n'est pas valable que pour certains choix de variable de dommage, avec un seuil très faible, ainsi la bilinéarité de dommage en fonction du nombre de cycles (linéaire en amorçage et linéaire en propagation avec une pente différente) ne peut être qu'un cas très particulier.

2 CUMUL LINEAIRE DE DOMMAGE SOUS CHARGEMENT PERIODIQUE

Désormais on ne traite que le cas de l'amorçage, qui à grand nombre de cycles correspond à la totalité de la durée de vie. Pour un essai traction-compression de base en déformation contrôlée alternée et dans un diagramme où on porte la contrainte maximale en fonction du nombre de cycles, la durée de vie d'une éprouvette peut être divisée de façon schématique en 3 parties (figure 1b). Une partie jusqu'à la stabilisation au point A (nombre de cycle N_S), de la stabilisation jusqu'à l'amorçage au point B (nombre de cycle N_{amorc}), et puis la propagation jusqu'à la rupture de l'éprouvette (nombre de cycle N_f). C'est un schéma idéal dans lequel la contrainte maximale entre N_S et N_{amorc} , (le long de AB) reste invariante. Il faut noter que l'horizontalité de AB est beaucoup plus visible à l'échelle normale en accord avec la figure 1a qu'en échelle logarithmique. On suppose par ailleurs que : $N_S \ll N_{amorc}$ ainsi l'endommagement de fatigue produit au cours de N_S cycles est supposé négligeable.

On note D la variable de dommage entre A et B au sens physique (fonction du volume de vide et de concentration et de la morphologie des cavités, etc.). Entre A et B on suppose $D = D(\text{caractéristiques de cycles}, n)$. Première hypothèse : D ne dépend pas de n , comme le cycle stabilisé n'est pas modifié à chaque cycle, la variation du dommage est identique à chaque cycle et donc le dommage est linéaire en fonction du nombre de cycle. A chaque cycle $D_i = 1/N_p$. Deuxième hypothèse : D est une fonction non linéaire du dommage. Le problème principal dans ce cas est qu'on ne voit pas comment au niveau macroscopique cette fonction peut être déterminée, à partir de la seule donnée du nombre de cycle à l'amorçage. On prend donc l'hypothèse classique suivante sachant qu'il existe une margé d'erreur indéterminée :

En amorçage le dommage est partagé uniformément sur chaque cycle entre A et B pour un essai à amplitude constante. $D_i = 1/N_{\text{amorc}}$

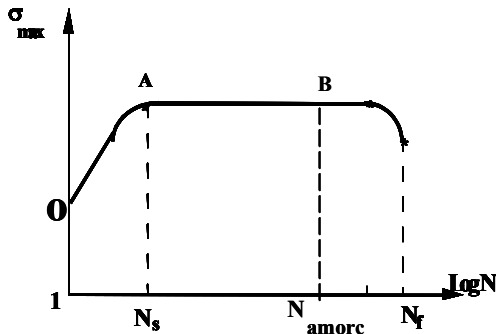


Figure 1b

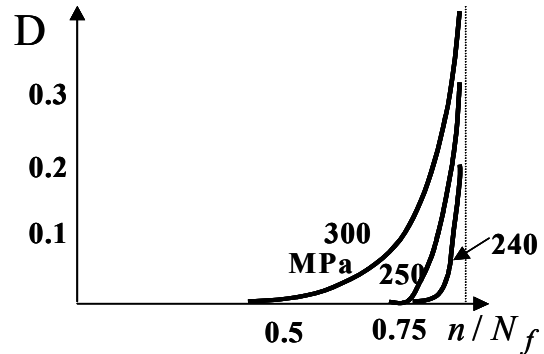


Figure 1a

3 CUMUL NON LINEAIRE ET EFFET DE SEQUENCE

Dans le cas d'un chargement à deux niveaux, avec des amplitudes ; $\Delta\epsilon_H/2$ (grand amplitude) et $\Delta\epsilon_L/2$ (petite amplitude), on définit $X = n_H / N_f(\Delta\epsilon_H/2)$, $Y = n_L / N_f(\Delta\epsilon_L/2)$. La fatigue ($D=1$) associée à un cumul linéaire est représentée par la droite $X+Y=1$ (figure 2a). Dans le cas où pour deux amplitudes de chargement différentes les courbes $D = D(n/N_f(\Delta\epsilon))$ ne seraient pas superposables (figure 1a) il y a un effet de séquence. C'est à dire la fatigue intervient plus facilement (figure 2b) pour un chargement H-L (High-Low), trajet **OABCDE** (sur l'abscisse) que pour un chargement L-H trajet **OFGHME** (avec $OF=DE$). En effet pour le trajet **OABCDE** on a à la rupture pour :

$$n_L / N_L(\Delta\epsilon_L/2) + n_H / N_H(\Delta\epsilon_H/2) < 1$$

Tandis que pour le trajet **OFGHME** on a à la rupture pour :

$$n_L / N_L(\Delta\epsilon_L/2) + n_H / N_H(\Delta\epsilon_H/2) > 1$$

Ceci se traduit dans le diagramme de Miner par le fait que les points représentatives de la fatigue se trouvent en-dessous de droite de Miner. Il existe donc un effet de séquence. Dans ce cas particulier dommage (H-L) > dommage (L-H). Mais ceci est lié au fait que la courbe de dommage associée à la plus grande amplitude a été placée au-dessus de celle de la plus petite amplitude de façon permanente, et ceci n'est pas toujours exact.

La figure 2a montre la présence d'un effet de séquence dans le cas d'un chargement à deux niveaux type H-L noté (type L) [3]. Les expériences utilisées concernent un acier inoxydable (316) à température ambiante, dans le cas d'un chargement traction compression uniaxiale alternée en déformation contrôlée. On montre que pour un chargement H-L la règle de Miner sur estime la durée de vie.

4 PROPOSITION DE MODELE POUR LE CUMUL DE DOMMAGE

L'essentiel de ce qui va être traité ici est de montrer qu'en amorçage, l'effet de la séquence (en endommagement), peut venir en grande partie non pas de la non linéarité du cumul de dommage mais de l'effet du pré-chargement sur le comportement cyclique. Plus précisément, la non validité de la règle de Miner a été liée dans la littérature en grande partie au fait qu'il faille cumuler non linéairement le dommage des grands cycles



Figure 3

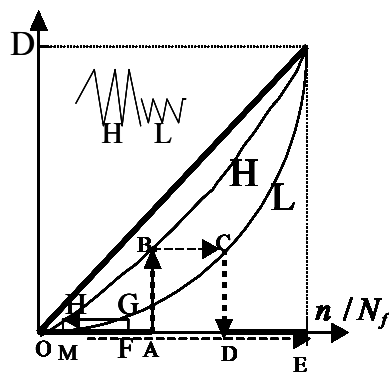


Figure 2b : effet de séquence

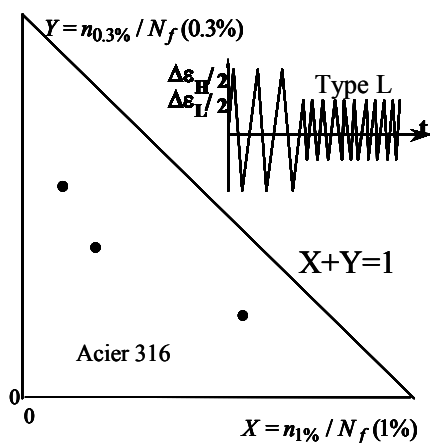


Figure 2a : effet de séquence et règle de Miner

(désigné par H, figure 3) au dommage du premier cycle du chargement L. Notre proposition est d'ajouter linéairement le dommage des cycles H au dommage produit par les cycles L ; mais auparavant, il faut modifier les cycles L en tenant compte des cycles H. Dans cette modification essentiellement les premiers cycles de H interviennent (A-C), en terme de pré-charge. Il est bien claire que la prise en compte de l'effet de pré-charge sur le comportement est automatique si on utilise des lois de comportement élasto-plastique. Le problème principal est que dans les domaines intermédiaires de durée de vie en fatigue (faible amplitude de déformation plastique) cette pratique est difficile du fait d'absence de loi de comportement élasto-plastique validé. L'analyse suivante est donc proposée :

On divise les métaux en deux groupes, pour les quels nous proposons les propriétés suivantes :

Type A : (l'acier ferritique A42, aluminium 1100.....) pour les quels on admet l'équivalence suivante :
cumul linéaire valable $\Leftrightarrow$ pas d'effet de mémoire de chargement sur la courbe cyclique

Type B : (les aciers inoxydables 304L, 316L.....), pour les quels en prenant en compte l'effet de mémoire des grands cycles sur le comportement élasto-plastique des petits cycles, la règle linéaire devient valable. La conséquence la plus importante est que les situations en contrainte et en déformation contrôlées sont très différentes et même opposées en terme de cumul de dommage. Ainsi cette différence entre contrainte et déformation contrôlée invalide les modèles non linéaires du cumul qui donnent toujours un endommagement plus grand pour une séquence H-L que pour la séquence L-H quelque soit le type du chargement; contrainte ou déformation contrôlée. Une méthodologie est proposée pour calculer le cumul de dommage pour les matériaux type B. La comparaison avec les essais d'endommagement à deux niveaux semble donner des résultats probants.

4.1 Relation entre le cumul linéaire et l'unicité de la courbe cyclique (matériau A)

La figure 4 montre l'effet d'une dizaine de cycles d'amplitude $\pm 1.85\%$ sur la durée de vie d'un acier ferritique A42 (matériau A) [4]. On remarque que l'effet de ce pré-charge est négligeable sur la courbe cyclique et sur la courbe de fatigue. Pour expliquer ce phénomène on peut faire le raisonnement suivant [5]: Dans un essai à amplitude constante, une stabilisation correspond à la formation finale de la micro structure (on néglige la relaxation de la contrainte). Une fois la structure stabilisée (point A de la figure 1b) les dislocations sont créées et annihilées de manière que la structure après chaque cycle se retrouve. On peut imaginer que si la microstructure est stable la variation du dommage à chaque cycle (quantité de lacunes créées) est identique entre A et B et que ceci ne modifie ni le comportement ni la vitesse de l'endommagement (coalescence). Ceci est compatible avec l'hypothèse d'admissibilité d'un cumul linéaire sous chargement périodique (section 2).

Que se passe t-il pour un chargement à deux niveaux ? Comme nous l'avons dit les structures sont identiques (dislocation non active) pour les deux niveaux de chargements. En effet si ceci n'est pas le cas quand on revient en arrière sur la courbe cyclique en revenant de la grande amplitude vers la petite on ne pourrait pas avoir la même boucle stabilisée que celle obtenue sans pré-charge. On est donc dans la même situation que le cas avec un chargement d'amplitude constante. La seule chose qui a probablement changé dans les deux cas de

chargement est le parcours moyen des dislocations actives qui est plus grand pour une grande amplitude que pour une petite amplitude. Le cumul linéaire semble donc justifiable avec les mêmes raisonnements que dans le cas d'un chargement périodique. En conclusion en amorçage :

Pour un matériau à courbe cyclique unique (matériau A) :
la validité de l'hypothèse du cumul linéaire pour un essai à amplitude constante
 $\Rightarrow$ **validité d'un cumul linéaire pour un essai à deux niveaux**

Les tests sur de l'aluminium dont la courbe cyclique est unique [6] montrent une quasi-validité de la règle du cumul linéaire pour ce matériau.

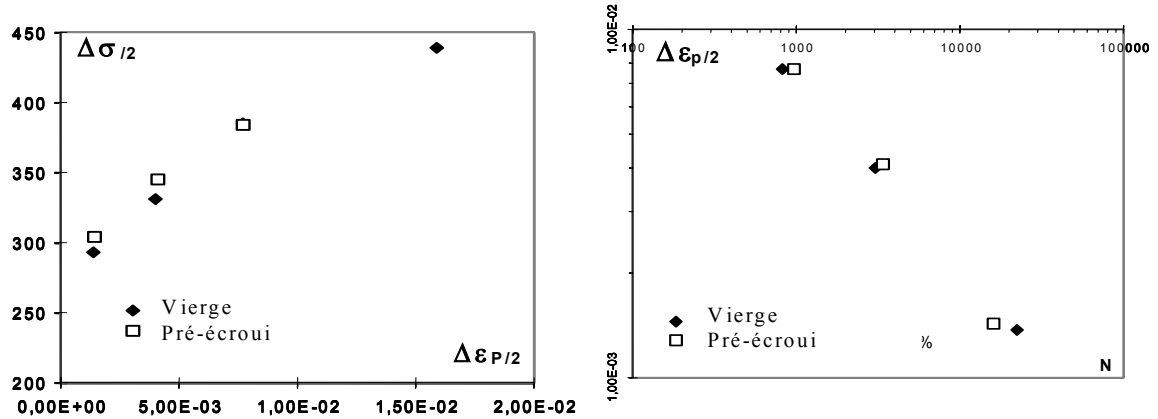


Figure4 Essai en déformation contrôlée acier ferritique A42, courbes cyclique et courbes de fatigue

4.2 Prise en compte de l'effet du pré-chargeement et cumul non linéaire (matériau B)

Pour un matériau du type B, la situation est différente : on retrouve un effet sur la durée de vie mais également sur l'état stabilisé représenté par la courbe cyclique. La figure 5 montre [4] l'effet d'une dizaine de cycles d'amplitude $\pm 1.9\%$ sur la durée de vie et la courbe cyclique d'un acier inoxydable 304L en déformation contrôlée. La figure 6 montre l'effet d'une dizaine de cycles d'amplitude $\pm 1.9\%$ sur la durée de vie et la courbe cyclique d'un acier inoxydable 316L en contrainte contrôlée. Ce pré-chargeement affecte simultanément la courbe de fatigue et la courbe cyclique. Il réduit la durée de vie en déformation contrôlée (figure 5) et l'augmente en contrainte contrôlée (figure 6).

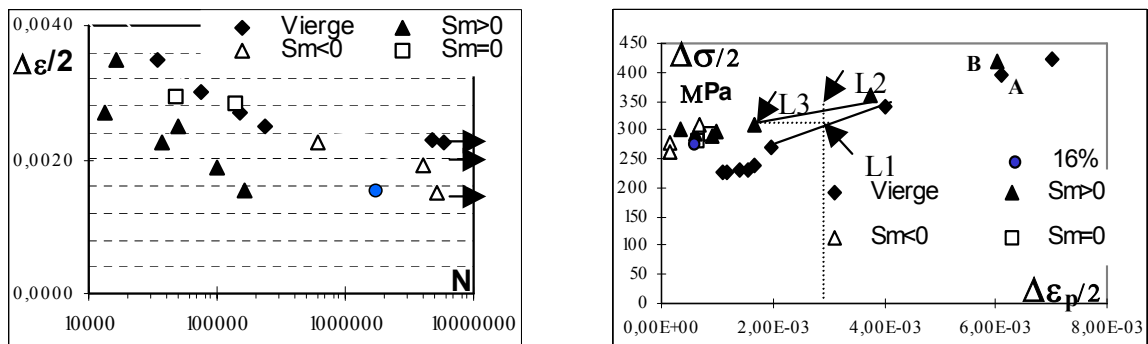


Figure 5 : Essais en déformation contrôlée, courbes cyclique et courbes de fatigue

Pour les matériaux du type B, il existe donc une différence de comportement en fatigue selon le mode de chargement (contrainte ou déformation contrôlée), qui s'explique de la manière suivante : la figure 7a, montre les courbes d'écrouissage cyclique pour un cas uniaxial de traction-compression. La courbe A montre la courbe cyclique sans pré-chargeement, la courbe B la courbe cyclique obtenue après 10 cycles à $\pm 1.9\%$. Si maintenant on compare les deux points L1 et L2, on observe qu'ils ont la même amplitude de déformation mais on note que l'amplitude de contrainte est plus grande après pré-écrouissage qu'avant. Ainsi on peut supposer légitimement que l'endommagement cyclique est plus grand en L2 qu'en L1. Un pré-écrouissage (ici cyclique) a donc un effet pénalisant sur la durée de vie en déformation contrôlée. Par contre, si on compare les points L1 et L3, on a la même amplitude de contrainte mais l'amplitude de déformation est plus petite en L3 qu'en L1. Ainsi l'endommagement cyclique est plus petit en L3 qu'en L1. Un pré-écrouissage a donc un effet bénéfique sur la

durée de vie en contrainte contrôlée. Cette même analyse peut être faite s'agissant d'un pré-écrouissage monotone important [4].

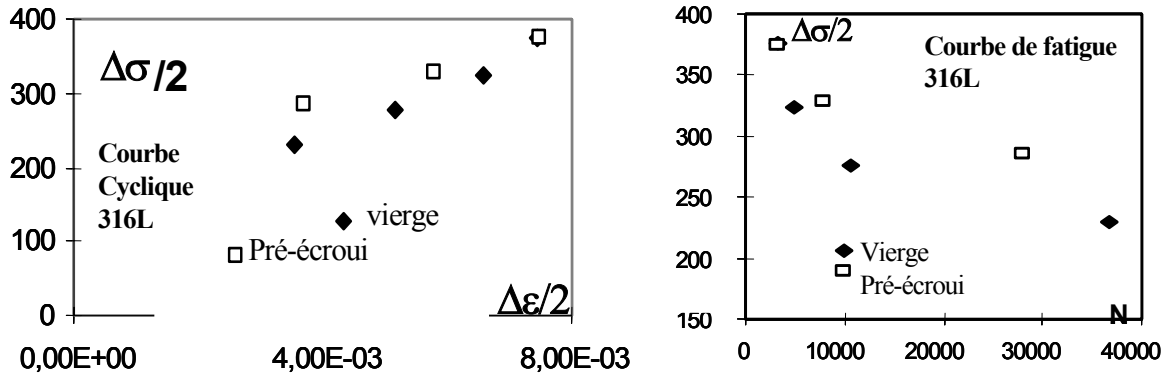


Figure 6 Essais en contrainte contrôlée, courbes cyclique et courbes de fatigue

4.3 Proposition pour le cumul de dommage (matériau B)

Prenons le cas d'un couple d'amplitude de chargements ($\Delta\epsilon_H/2 = 1\%$, $\Delta\epsilon_L/2 = 0.3\%$). La nouvelle méthode de calcul de dommage se fait de la façon suivante (figure 7) : On monte à la verticale de $\Delta\epsilon_L/2 = 0.3\%$ pour retrouver la courbe cyclique de retour avec une amplitude de $\Delta\epsilon_H/2 = 1\%$. Le passage horizontal sur la figure nous permet de retrouver la courbe cyclique sans pré-écrouissage, et puis la descente verticale nous donne une amplitude équivalente de $\Delta\epsilon_L^{eff}/2 = 0.6\%$. Le dommage est donné par :

$$D = n_{0.3\%} / N_f(0.6\%) + n_{1\%} / N_f(1\%)$$

L'équation de la droite définissant la limite supérieure du dommage dans le diagramme de Miner est :

$$Y = \frac{N_f(0.6\%)}{N_f(1\%)}(1 - X)$$

Les résultats sont comparés avec une règle non-linéaire où $D(\Delta\epsilon, n) = g(n / N_f(\Delta\epsilon))^{f(\Delta\epsilon)}$ f est une fonction non linéaire [3]. Sur la figure 8a les mêmes résultats sont présentés pour le couple ($\Delta\epsilon_H/2 = 1\%$, $\Delta\epsilon_L/2 = 0.2\%$).

4.4 Discussion sur les résultats (matériau B)

On remarque une bonne représentation des points expérimentaux pour le couple ($\Delta\epsilon_H/2 = 1\%$, $\Delta\epsilon_L/2 = 0.2\%$) par la méthode proposée, et une moins bonne représentation pour le couple ($\Delta\epsilon_H/2 = 1\%$, $\Delta\epsilon_L/2 = 0.3\%$). Tout d'abord il faut dire que les courbes cycliques et les courbes de fatigue sont prises dans des références différentes, ce qui introduit une certaine dispersion. Par ailleurs il y a le problème de la relaxation des contraintes. Pour le cas $\Delta\epsilon_L/2 = 0.2\%$, avec une amplitude de charge maximale $\Delta\epsilon_H/2 = 1\%$ la relaxation est probablement beaucoup moins importante que pour l'amplitude $\Delta\epsilon_L/2 = 0.3\%$. On peut noter ceci sur la figure 9 où après un pré-chargement de 10 cycles à $\pm 1.9\%$ (en liaison avec la figure 5) les contraintes moyennes se relaxent. Pour une amplitude de $\Delta\epsilon/2 = 0.27\%$ la relaxation est totale à environ 10 milles cycles, tandis que pour une amplitude de $\Delta\epsilon/2 = 0.19\%$ même jusqu'à la rupture (au-dessus d'un million de cycles) une contrainte moyenne importante est préservée. Ainsi dans le deuxième cas l'effet de mémoire disparaît peu à peu le dommage à chaque cycle devient moins important on s'approche de la droite de Miner pour l'essai, tandis que le modèle ne prend pas en compte cette relaxation. Ceci nous semble confirmé par les résultats de la figure 8b où un pré-chargement périodique amène le niveau de la contrainte à l'état initial et on retrouve des meilleurs résultats donnés par le modèle. Ainsi si on définit les courbes cycliques non pas par leur amplitudes de contrainte maximale mais par l'amplitude de contrainte à demi durée de vie probablement un meilleur résultat sera obtenu par le modèle proposé.

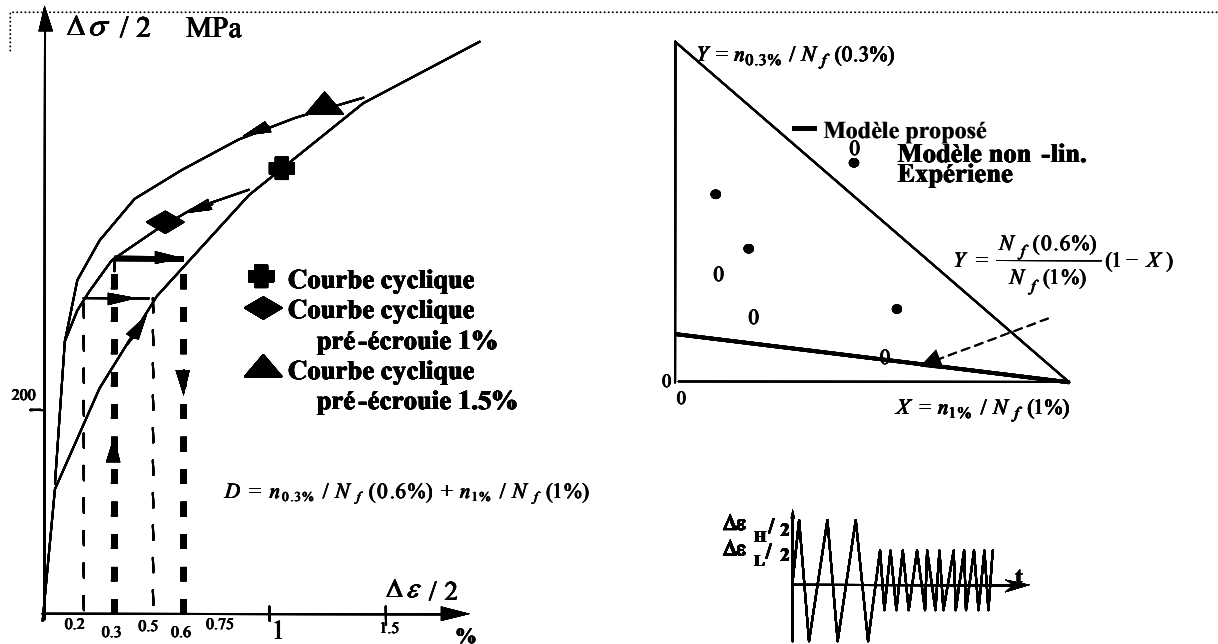
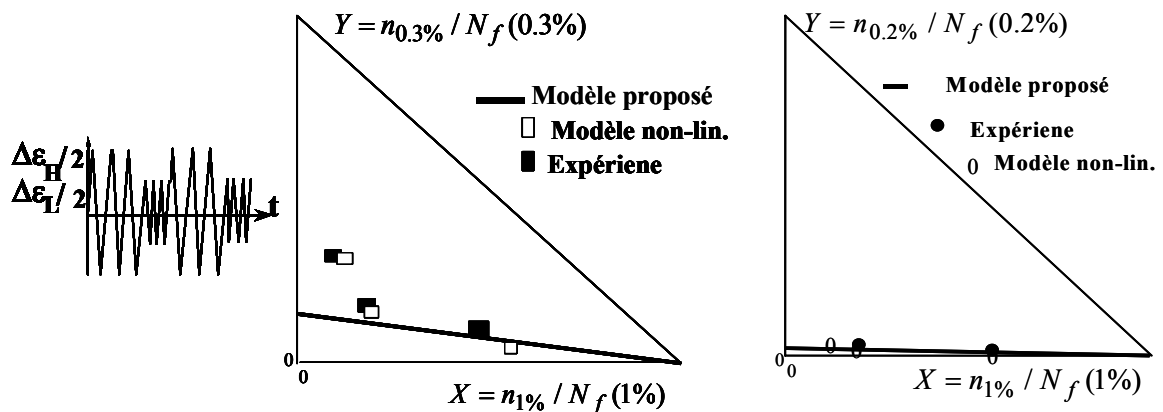


Figure 7 : Nouveau modèle de cumul de dommage règle linéaire + l'effet du pré-écrouissage



8a : différents modèles dans le cas de surcharge répétitive

8b

5 EXTENSION AU CAS AMPLITUDE VARIABLE

En amplitude variable, on aura du mal à définir les notions de contrainte et de déformation imposées sous chargement cyclique au sens précédent. Néanmoins des essais réalisés sur un acier 304L[7] (matériau B) montrent, qu'il y a une différence entre contrainte imposée et déformation imposée. Nous avons comparé l'application de la règle de miner combinée avec la méthode rainflow. On remarque (tableau 1) que dans le cas de contrainte contrôlée, les résultats des calculs sont conservatifs par rapport aux tests et que ceci n'est pas le cas en déformation contrôlée. Plusieurs interprétations peuvent être données, dont la plus pertinente nous semble la suivante : Même en amplitude variable quand on applique des blocs de chargement les maxima se répètent. Si le nombre de bloc est suffisamment important la répétition de ce maxima créera un pré-écrouissage aux premiers blocs qui influera les résultats de l'endommagement sur les blocs suivants. Ainsi le conservatif en contrainte contrôlée est lié au fait que les surcharges améliorent la durée de vie expérimentalement contrairement au cas de la déformation contrôlée.

Nous en concluons que très probablement pour les matériaux du type A en amplitude variable, comme en amplitude constante à deux niveaux, un comptage rainflow + la règle de cumul linéaire doit donner des réponses acceptables.

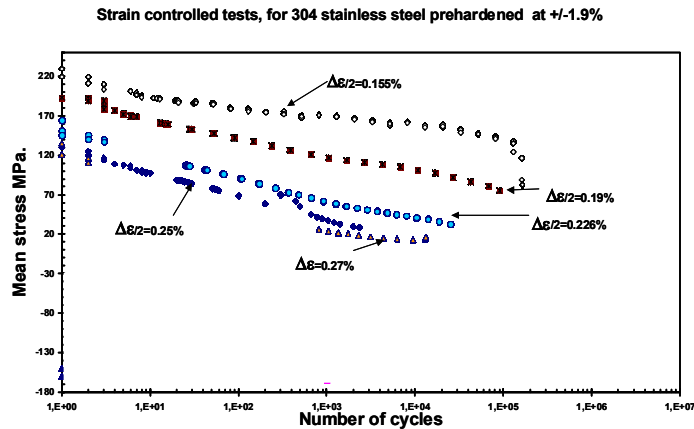


Figure10 relaxation de contrainte pour différentes amplitude de chargement

Tableau 1

TYPE DU CHARGEMENT	stress (1)	strain(1)	stress(2)	strain(2)	stress(3)	strain(3)
amplification factor	- 4	+ 4	+3.6	+3.6	-3.3	-3.3
mean stress MPa	+ 54	-20	- 49	+120	+53	-160
FATIGUE LIVES						
Experimental	80 000	37 000	588 000	69 000	450 000	413 000
Rainflow + Miner	77 000	92 000	263 000	592 000	580 000	1063 000
Rainflow + Miner + Correction Goodman	29 000			213 000	215 000	

6 CONCLUSION

- Pour les matériaux avec une courbe cyclique unique (acier ferritique A42, etc..) la règle de cumul linéaire est probablement valable. On conclut que dans le cas amplitude variable la combinaison de la règle de cumul linéaire et la méthode du comptage rain-flow doit être acceptable.
- Par contre pour un matériau sans unicité de la courbe cyclique (acier inoxydable) il faut prendre en compte l'effet du pré-chargement. On montre alors que pour cumuler le dommage on peut combiner un cumul linéaire et l'effet du pré-chargement des grand cycles sur le comportement cyclique des petits cycles en remplacement des modèles de cumul non linéaire. L'avantage de cette méthode est qu'elle différencie les situations en contrainte imposée et en déformation imposée contrairement aux méthodes non linéaires qui ne sont pas basées sur les calcul élastoplastiques. Extension au cas amplitude variable montre que pour un chargement par bloc la combinaison de la règle de Miner et le comptage rainflow doit être conservatif en contrainte contrôlée et non conservatif en déformation contrôlée.

7 REFERENCE

- [1] : A. Fatemi, L. Yang, "Cumulative fatigue damage and life prediction theories : a survey of the state of the art for homogeneous materials". Int. J. of Fatigue, Vol. 20, N° 1, pp-9-34,1998.
- [2] : J. Lemaitre et J.L Chaboche, "Mécanique des matériaux solides", Dunod, 2002.
- [3] : S.M Marco, W.L. Starkey "A concept of fatigue damage " Transaction of ASME vol. 76, pp 617-632, 1956.
- [4] : V. Doquet, S. Taheri, S., "Effet d'un pré-écrouissage ou d'un sur-écrouissage sur la durée de vie en fatigue de divers aciers à contrainte ou déformation imposée," Bulletin SFM, Revue Française de Mécanique, N°1, 2000.
- [5] : Taheri, S., "Low cycle fatigue damage cumulation rule for non proportional loading," Multiaxial and fatigue design, ESIS 21, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 283-299, 1996.
- [6] : A. Fatemi, S. Taheri à paraître
- [7] : S. Taheri, V. Doquet, Evaluation of Non Conservatism of Combined Rainflow Counting and Miner's Rule for Damage Cumulation in Strain Controlled Fatigue, SMIRT 16 , Washington, 2001.