

ESTIMATION DE LA COURBES WÖHLER DES EPROUVETTES LISSES A PARTIR DE CELLE DES EPROUVETTES ENTAILLEES DE L'ACIER A36

¹JILALI NATTAJ, ²HASSAN CHAFFOUI; ³MOHAMED SAFE. ⁴EL GHORBA MOHAMED

¹Faculté des sciences et technique Mohammedia

j.nattaj@gmail.com

²Faculté des sciences et technique Mohammedia

Hassan.chaffoui@gmail.com

³laboratoire de contrôle et de caractérisation mécanique des matériaux et des structures, ENSEM Casablanca

mohamed.safe@cegelec.com

Résumé – Le but de cette recherche est la prédiction de la durée de vie de l'acier ordinaire A36 par l'utilisation de la méthode de la théorie unifiée, séparation des phases d'amorçage/propagation et taux de réduction de nombre de cycle à la rupture sous un, niveau de chargement donné. Des résultats expérimentaux issus des tests de fatigue sur des éprouvettes doublement entaillées, combinées à des essais statiques par machine de traction les valeurs calculés sont analysées, discutés et comparés.

Ces approches nous permettra à la fois d'apprécier l'impact d'un endommagement inopiné sur la durée de vie de l'acier A36 et de prédire sa durée de vie voir même l'améliorer.

Mots clés –Acier A36, fiabilité, dommage, théorie unifiée, Amorçage-propagation, taux de réduction de cycle à rupture.

1. Introduction

Les réseaux de tuyauterie en acier A36 sont souvent soumis à des charges cycliques dus à des fluctuations de pression. Ces variations de pression sont sources de fatigue du matériau, accéléré parfois par la présence de nocivités environnementales.

Cette situation a pour conséquences une dégradation de la durée de vie prévisionnelle du matériau impacté nécessitant une ré-estimation de sa durée de vie résiduelle en présence du défaut, ce qui permettra aux services maintenance de disposer de données essentielles pour la prise de décision sur leurs interventions.

Dans la littérature, les différentes approches théoriques développées par différents auteurs ont abordés ce phénomène de dégradation accélérée en émettant différentes hypothèses tel que la linéarité du dommage proposée par Miner [8] et celle accumulative proposée par Gatt [3]/Valuri [2].

En se basant sur les modèles précédents, la théorie unifiée [1] a développé un modèle de dommage, que nous estimons l'outil adapté pour servir d'une approche modèle, que nous comparons aux approches développés dans notre recherche en faisant introduire le paramètre de la fraction de vie β et d'autres paramètres spécifiques.

2. THEORIE UNIFIE

La perte de la résistance peut être associée à la résistance en traction statique ou à la résistance en fatigue sous l'effet du dommage du au chargement cyclique. Le concept du dommage causé par l'énergie associée à la déformation plastique cyclique pour des contraintes supérieures à la limite d'endurance a été suggérée originalement par Henry [2], et repris ensuite par Gatts [3]. Se servant de certaines caractéristiques des théories de shanley [4] et de Valluri . Bui-Quoc [1] a développé la théorie unifiée de fatigue ; il a suggéré une expression dérivante le taux de perte de la limite d'endurance du matériau soumis au chargement cyclique. Ainsi, La contrainte ultime résiduelle non-dimensionnelle $\frac{\sigma_{ur}}{\sigma_u}$ en

fonction de $\beta = \frac{n_i}{N_f}$ est obtenue comme suit [1] :

$$\frac{\sigma_{ur}}{\sigma_u} = \gamma - \frac{1}{\frac{1-\beta}{\gamma-1} + \frac{\beta}{\gamma - (\frac{\gamma}{\gamma_u})^8}} \quad (1)$$

Le Dommage normalisée D a été défini par :

$$D = \frac{(1 - \gamma_{er})}{(1 - \gamma_e)} \quad (2)$$

Ce qui conduit à :

$$D = \frac{\beta}{\beta + (1 - \beta) \left[\frac{\gamma - (\frac{\gamma}{\gamma_u})^8}{\gamma - 1} \right]} \quad (3)$$

3-METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

3-1- Propriétés mécaniques de l'acier A36

Spécification	Propriétés		
	σ_u (Mpa)	σ_y (Mpa)	E(Gpa)
A36	621	372	200

3-2- Composition chimique de l'acier A36

Spécification	Composition					
	C	Mn	P	S	Si	Cu
A36	0,29	0,8-1,2	0,09	0,05	0,15-0,30	0,2

Tel que : σ_u : Contrainte ultime du matériau original ;
 σ_y : La limite élastique du matériau ;
 E: le module d'élasticité.

3-3-Eprouvettes :

Les dimensions des éprouvettes sont montrées à la figure N°1. La section après usinage des éprouvettes en acier est de 221.9 mm², dont la partie la plus délicate consiste à réaliser un rayon à fond d'entaille le plus aigu possible pour pouvoir initier une fissure de fatigue à des contraintes faibles. Le procédé d'usinage à l'aide des fraises scies a été exécuté en plusieurs opérations :

- 1- Usinage à la fraise des deux faces parallèles à l'entaille ;
- 2- Usinage avec une fraise d'ébauche de l'entaille en V. On obtient alors un plat à fond d'entaille d'environ 0.5 mm².
- 3- Finition du fond d'entaille avec une fraise bien affûtée en respectant l'angle de 60°.Le rayon doit être inférieur à 0.1 mm.

Nous avons vérifié ce rayon à fond d'entaille par le microscope à un grossissement de 280 fois, les entailles ainsi usinées ont un rayon d'environ 0.05 mm²

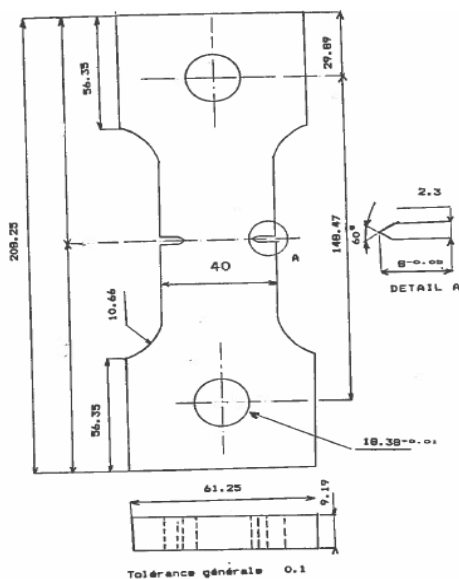


Fig. 3.1 - Dimensions de l'éprouvette en (mm).

Figure N°1

3.4-Déroulement Déroulement des essais

3-4-1 Contrôle des paramètres à chaque essai

a)- Les paramètres contrôlés pendant la durée de chaque essai de fatigue sont fixés comme suit :

- La contrainte appliquée doit être à amplitude constante (charge contrôlée)

-Le signal doit être sinusoïdal.

-La variation de la longueur de la fissure est mesurée à tous les 1000 cycles pour l'acier A36

b)- Les paramètres contrôlés pendant la durée de chaque essai en traction statique sont :

- Le déplacement du piston qui doit être contrôlé avec un taux d'accroissement constant (signal triangulaire)

-La durée d'essai de 30 mm pour l'acier A36.

-La mesure de déplacement.

-La mesure de la charge.

3-4-2 ESSAIS DE FATIGUE

Pour déterminer de la durée de vie à la rupture, des essais de fatigue à amplitudes constantes, jusqu'à la rupture, sous trois niveaux de chargement 352, 282 et 248 MPa en mode de contraintes contrôlées ont été réalisés sur trois échantillons en acier A36.

3-4-3 ESSAIS STATIQUE

Pour chaque niveau de chargement (352, 282 et 248 Mpa), dix spécimens entaillés ont été fatigués à chaque 1000 cycle. Ensuite, des essais de traction statique ont été munis afin de déterminer la résistance résiduelle du matériau.

L'expérimentation a révélée que la fissure progresse et atteint une longueur voisine de 0,1 mm, puis elle se propage régulièrement à travers la section, la dimension 0,1 mm correspond à une taille de défauts comparable à la taille de trois grains de l'acier quand elle est à la fin de stade de l'initiation, le diamètre du grain de l'acier A36 est d'environ 0.032 mm. Nos résultats son interprété suivant les contraintes appliqué a une dimension d'initiation $2a_0 = 0.2$ mm.

3-4-4 RESULTATS

A un niveau de contraintes $\Delta\sigma = 248$ Mpa
 L'initiation se fait jusqu'à $N_a = 2000$ cycles pour une durée de $N_f = 32000$ cycle ;

A un niveau de contraintes $\Delta\sigma = 282$ Mpa
 L'initiation se fait jusqu'à $N_a = 1000$ cycles pour une durée de $N_f = 20000$ cycle ;

A un niveau de contraintes $\Delta\sigma = 352$ Mpa
 L'initiation se fait jusqu'à $N_a = 500$ cycles pour une durée de $N_f = 6851$ cycle

4- ESTIMATION DU DOMMAGE PAR LA THEORIE UNIFIEE

-La relation N°3 nous permet de tracer les courbes ci-dessous

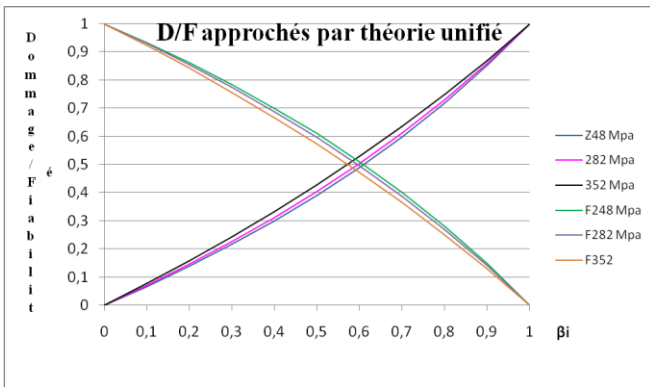


Figure 2 Courbes Dommage fiabilité en fonction de

$$\beta_i = \frac{n_i}{N_f} \text{ pour les trois niveaux de contrainte}$$

a. Conclusions

1-La résistance de chaque métal, est un paramètre constant, indépendamment des différents niveaux de chargement, à l'état original, elle évolue à l'opposé du nombre de chargement cyclique. La perte de cette résistance est accompagnée d'une perte de l'endurance du matériau étudié, cette perte est considéré comme un paramètre intrinsèque qui sert à évaluer le dommage du à la fatigue (Figure 1). Par conséquent, la durée de fin de vie s'accélère est à sa limite le dommage vaux L'unité.

2-Les essais de fatigue réalisés sur des éprouvettes entaillées sous les trois niveaux de chargement $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ (respectivement égaux à 248, 282 et 352 Mpa) montrent que le rapport

$$\frac{N_a}{N_f} \cong \text{Constante} \cong 6\%$$

La valeur de 6% est une valeur moyenne, le rapport $\frac{N_a}{N_f}$

est sensiblement égal pour l'ensemble des niveaux de chargement $\Delta\sigma$ a cause de la qualité de l'entaille qui consomme un nombre de cycles équivalent très important par rapport a $(N_f)_{\Delta\sigma}$

5. Prédiction du Nombre de cycle à la rupture N_f de l'acier A36 par l'approche de la théorie unifiée : courbe de Wöhler

5.1 DETERMINATION DE LA LIMITE D'ENDURANCE :

L'entaille diminue sensiblement la limite d'endurance d'une éprouvette, la réduction de cette limite d'endurance peut être déterminée par un coefficient K_f donné par [6] :

$$K_f = \frac{\sigma_0}{\sigma_0^*} \quad (4)$$

Avec : σ_0 = Limite d'endurance éprouvette lisse

σ_0^* = Limite d'endurance éprouvette entaillée

Si K_t le coefficient de concentration de contrainte statique au fond d'entaille, la sensibilité du matériau, notée "q", à l'entaille est définie par :

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (5)$$

Le graphique de variation de l'indice de sensibilité à l'effet d'entaille pour des aciers de résistance comprise entre 400 et 700 Mpa [6], nous permet d'estimer l'indice de sensibilité de l'acier A36 ($\sigma_u = 558$ Mpa) à $q = 0,55$.

La présence d'entaille (aigüe) entraîne un coefficient de concentration de contrainte locale, K_t de l'ordre de 4 à 5.

Ce qui nous donne un $K_f = 3,2$

done $\sigma_0^* = 3,2 \cdot \sigma_0$

$$K_f = \frac{\sigma_0}{\sigma_0^*} \Rightarrow \sigma_0 = 3,2 \cdot \sigma_0^*$$

$$\sigma_0 = 0,5 \cdot \sigma_u$$

a. Se situe autour de 0,4 ; $\sigma_u = 558$ Mpa

$$\sigma_0^* = 70 \text{ Mpa}$$

-La théorie unifiée approche le dommage subit par un matériau, par la réduction de son endurance.

-L'expression du taux de variation de la limite d'endurance adimensionnelle γ_0 en fonction de n_i

$$\frac{d\gamma_0}{dn_i} = \frac{1}{K_a} \times \gamma^b (\gamma - \gamma_e) \quad (6)$$

-La valeur instantanée σ_e de l'acier est reliée à la résistance statique instantanée σ_{ur} du matériau comme suit [1]

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_0} = \left(\frac{\sigma_{ur}}{\sigma_u} \right)^8$$

Tel que : $\sigma_e = 1$ pour $n_i = 0$

$$\gamma_e^* = \left(\frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^8 \quad \text{Si } n_i = N_f$$

-L'intégration de l'équation (6) donne une approche de la courbe de fatigue ($\sigma - N$) et prend la forme suivante :

$$N_f = K_a \cdot \frac{1}{\gamma^b} \left[\frac{1}{\gamma - 1} - \frac{1}{\gamma - \left(\frac{\gamma}{\gamma_u} \right)^8} \right] \quad (7)$$

-Avec b et K_a sont des constants des matériaux.

-Notre démarche consiste justement à déterminer ces deux constantes, en exploitant les résultats expérimentaux afin de pouvoir prédire et retracer la courbe ($\sigma - N$), pour ce faire on a pris 2 points suffisamment espacés parmi les trois contraintes utilisées dans l'expérimentation (282 et 352 Mpa dans notre cas), ce qui nous a donné ;

$$K_a = 3,7 \cdot 10^6 \text{ Cycles} \quad b = 2,03$$

-L'équation (7) nous permet de donc de tracer la courbe $(\sigma - N)$ **Eprouvettes entaillées.**

5.1 Courbe (σ, N) Approchée par théorie unifié pour éprouvettes avec entailles.

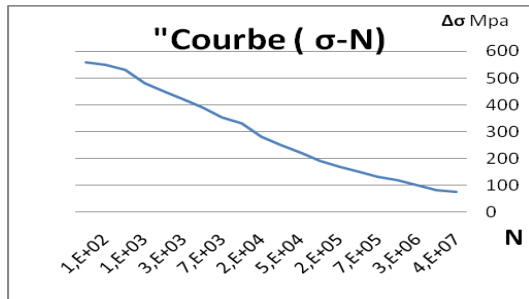


Figure 3- Courbe (σ, N_f) éprouvette entaillée

-La courbe $(\sigma - N)$ montre bien les trois zones de la courbe de Wöhler (Olygo cyclique en deçà de 2.10^3 , la partie à grand nombre de cycle au delà de 10^3 jusqu'à une limite d'endurance qui tend vers une asymptote horizontale à $N = 10^6$)

-Vérification de l'équation:

-Une comparaison entre le nombre de cycle a la rupture N_{fex} (déduits de l'expérimentation) et N_{fc} (calculé par la formule (7) correspondant aux trois niveaux de chargement appliqués (248, 282 et 352 Mpa) est donnée par la figure 3 ci-dessous :

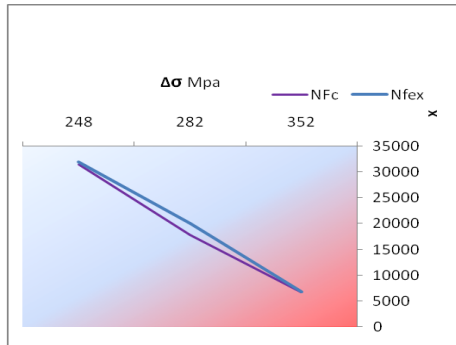


Figure 4

-Le graphique montre un écart très faible entre les deux courbes, chose qui conforte bien la bonne approche de la courbe $(\sigma - N)$ de la Figure 3.

5-2- Courbe (σ, N'_f) Approchée pour éprouvettes sans entailles.

La courbe de Wöhler [2] sous sa forme logarithmique s'écrit de la façon suivante :

$$\Delta \sigma_{ar} = C + D \cdot \log(N'_f) \quad (8)$$

Hypothèse : Cette relation est valide pour $10^2 \leq N'_f \leq 10^7$

$$N'_f = 10^7 \Rightarrow \Delta \sigma_{ar} \approx \sigma_0 = 224 Mpa$$

$$N'_f = 10^2 \Rightarrow \Delta \sigma_{ar} \approx \sigma_u = 558 Mpa$$

Ces deux conditions aux limites nous donnent :

$$C = 692 \text{ Mpa} \quad \text{et} \quad D = -67 \text{ Mpa}$$

(8) devient :

$$\Delta \sigma_{ar} = 692 - 67 \cdot \log N'_f \quad (9)$$

$$\Rightarrow N'_f = 10^{(10,33 - 0,015 \Delta \sigma_{ar})} \quad (10)$$

Pour $\Delta \sigma_{ar} \in [\sigma_0 = 224 \text{ Mpa}, \sigma_u = 558 \text{ Mpa}]$ (9) nous permet de tracer la courbe (σ_a, N'_f)

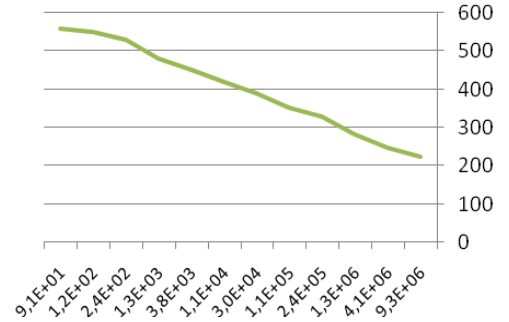


Figure 5- Courbe (σ, N'_f) éprouvette sans entaille

5.3 -Comparaison entre les deux courbes (σ, N_f) et (σ, N'_f) figure N°5 ci-dessous

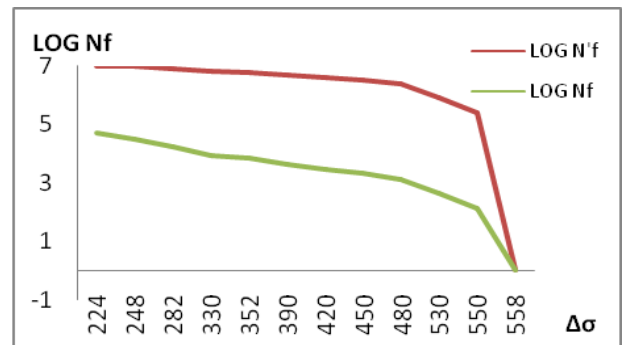


Figure 5

5.4 Conclusion

L'écart entre les deux nombres de cycles à rupture respectivement $(N_f)_{\Delta \sigma}$ (avec entaille) et $(N'_f)_{\Delta \sigma}$ (sans entaille) varie à l'inverse de l'acart $(\sigma_u - \Delta \sigma)$ pour s'annuler quand $\Delta \sigma$ tend vers σ_u

6. References:

- [1] J.Dubuc, T. Bui-Quoc, A.Bazergui, A.Biron-« Unified Theory of cumulative Damage in metal fatigue » Rapport soumis à PVRC, Vol I et II, Ecolepolytechnique, Avril 1969
- [2] Henry: A theory of fatigue damage accumulation in steel trans.of the ASME 77 (1965)913-918
- [3] Gatt: R, R.Gatts- Trans, ASME, JL of Bas.Eng. Vol 83, 1961, P 529-540
- [4] Shanly: E. R. shanley – The Rand corp. Rapport P-350, 1953
- [5] Valluri: S.R.Valluri, JL of aerosp. Eng. Vol 20, 1965, P 18-19, 68-89

- [6] Lieurade & Lu, Variation of the sensitivity index to the notch effect for steels with a Mechanical strength between 400 and 700 Mpa, figure 1.8, Book written by Gabriel Octavian Turcan, Polytechnic School of Montreal
- [7] Wöhler 1870
- [8] M. Miner – Trans ASME, JL of Appl. Mech, Vol 67. 1945, P A.159- A 1664

7. Principales Notation

$$\Upsilon = \frac{\sigma}{\sigma_0} \text{ Paramètre de contrainte}$$

$$\Upsilon_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_0}$$

σ_u = Contrainte ultime du matériau original

σ_{ur} = Contrainte ultime du matériau fatigué

σ_0 = Limite d'endurance du matériau original

$$\beta_i = \text{fraction de vie} = \frac{n_i}{N_f}$$

n_i = Nombre de cycle instantané

N_f, N'_f = Nombre de cycle à la rupture sous $\Delta\sigma$ donnés respectivement pour éprouvettes entaillée et sans entaille