



Modélisation du durcissement cyclique de l'aluminium produit au Cameroun

**Bertin Désiré Soh Fotsing^{1*}, Médard Fogué¹, Guy Fortuné Anago²
Bienvenu Kenmeugné³, Emile Nguena⁴ et Jean Louis Robert⁵**

¹*Laboratoire d'ingénierie des systèmes industriels et de l'environnement (LISIE), IUT de Bandjoun, BP 134 Bandjoun, Cameroun*

²*Laboratoire d'études et de recherches en techniques industrielles (LERTI), Ecole polytechnique d'Abomey Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

³*IUT de Ngaoundéré, BP 455 Ngaoundéré, Cameroun*

⁴*Alucam-Socatral, BP 54 Edéa, Cameroun*

⁵*Laboratoire de mécanique et d'ingénierie (LAMI), IUT de Montluçon, France*

(Reçu le 03 Avril 2006, accepté le 17 Septembre 2006)

* Correspondance, courriel : sohfotsing@ifrance.com / ganago@yahoo.fr

Résumé

L'érouissage est un paramètre très important pour traduire le comportement élasto-plastique des matériaux, particulièrement pour la simulation de leur mise en forme par déformation plastique.

Cet article présente un modèle de durcissement cyclique de deux nuances d'aluminium produites au Cameroun, le « 1200 » et le « 5005 ». L'expérimentation a été conduite sous sollicitations quasi-statiques ou variables à amplitude constante. Les résultats obtenus ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques statiques en traction et en compression des nuances étudiées et d'établir leurs courbes d'érouissage monotone et cyclique.

L'amplitude de contrainte est une fonction linéaire de la déformation plastique dans un repère à échelles logarithmiques, ce qui permet une

modélisation simple de la loi d'érouissage cyclique des matériaux étudiés.

Mots-clés : *Aluminium, érouissage, durcissement, fatigue oligocyclique, loi de comportement, Cameroun.*

Abstract

Modelling of the cyclic hardening of aluminium produced in Cameroon

Strain-hardening is a very significant parameter to traduce the elastoplastic behaviour of materials, particularly for the simulation of their working by plastic deformation.

This paper presents a model of cyclic hardening of two nuances of aluminium produced in Cameroon, the 1200 and the 5005. The experimentation was led under quasi-static or variable stresses with constant amplitude. The results obtained allow to determine the static mechanical characteristics in tension and compression of the studied nuances and to establish their monotonous and cyclic strain-hardening curves. The amplitude of stress is a linear function of the plastic deformation in a logarithmic scale, which allows a simple modelling of the law of cyclic work hardening of studied materials.

Keywords : *Aluminium, strain-hardening, hardening, oligocyclic fatigue, behaviour law, Cameroon.*

1. Introduction

L'érouissage est un paramètre très important pour exprimer le comportement élasto-plastique des matériaux, particulièrement pour leur mise en forme par déformation plastique. Il trouve son origine dans l'évolution de la texture cristallographique du matériau et l'accumulation

de l'énergie de dislocation lors de la déformation. Fonction de la déformation cumulée et du matériau, il se traduit généralement par un durcissement des métaux.

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude du comportement de l'aluminium soumis à des déformations importantes sujettes à un écrouissage. *Quainoo et al.* [1] ont évalué l'effet de l'écrouissage sur le procédé de précipitation de l'alliage « AA6111 » en vue d'établir son rôle sur les caractéristiques de renforcement. Les résultats montrent une amélioration considérable de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction avec une augmentation du niveau de pré-déformation. *Chenal et al.* [2] ont étudié les mécanismes d'écrouissages d'alliages d'aluminium dans les conditions de déformations à chaud et à froid. Les lois d'écrouissage sont présentées ainsi que l'évolution de la microstructure par recristallisation. Ils ont utilisé plusieurs modèles pour décrire l'écrouissage tels que la loi de *Ludwik* et la loi de *Hollomon* [2].

$$\sigma_0 = \sigma_e + k_1 \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

$$\sigma_0 = k_2 \bar{\epsilon}^n \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

où k_1 , k_2 , n et m sont des paramètres du matériau déterminés expérimentalement.

- N : coefficient d'écrouissage
- m : coefficient de taux de sensibilité de contrainte
- σ_e : limite d'élasticité
- σ_0 : contrainte d'écoulement
- $\bar{\epsilon}$: déformation équivalente

Lopes et al. [3] déterminent des courbes contrainte-déformation en traction et en cisaillement pour des tôles en aluminium 1050-O (recuit) suivant les directions 0° , 45° et 90° par rapport à la direction de laminage avec une vitesse de déformation de l'ordre de $\dot{\epsilon} = 0,01s^{-1}$. Ces essais ont permis de déterminer les coefficients d'écrouissage n et m pour la loi d'écrouissage standard de *Hollomon* (relation 2).

Inigoraj et al. [4] ont déterminé expérimentalement le coefficient

d'écrouissage n et du coefficient de contrainte K en fonction de la densité d'un alliage d'aluminium composé de 3,5 % de poudre d'alumine en compression. Les auteurs trouvent des valeurs de n variant entre 0,166 et 0,340 pour des rapports de densité variant de 0,90 et 0,75 dans un état recuit (200°C pendant 30 mn) et de 0,174 à 0,405 dans un état non recuit. Aussi, le coefficient de contrainte K prend des valeurs allant de 133 à 176 dans l'état recuit et 146 à 202 dans l'état non recuit suivant le taux d'allongement.

Plusieurs études ont été également menées sur l'écrouissage cyclique des nuances d'aluminium des séries 3000, 5000, 6000 et 7000. *Dirras* [5] a étudié la relation entre le comportement macroscopique et l'évolution de la microstructure pendant une déformation cyclique de l'alliage 3004 d'aluminium. L'étude est faite à partir d'essais de cisaillement alterné symétrique sur des tôles d'épaisseur 0,3 mm dans trois états initiaux différents (recristallisé, recuit ou pré-écroui) à vitesse de déformation constante de $4,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. *Ellyin et al.* [6] quant à eux ont étudié le comportement de l'alliage d'aluminium 6061 soumis à des sollicitations cycliques uni-axiales et multiaxiales. Le composite s'écrouit durant tout le cycle de chargement et ne présente aucun état stable pour les états recuit et pré-écroui (extrusion). Dans l'état trempé (recristallisation), l'écrouissage cyclique apparaît seulement dans les premiers cycles et se stabilise jusqu'à la rupture.

L'étude des mécanismes de durcissement des matériaux est très importante pour le développement des modèles de prédiction de durée de vie et l'évaluation de la fiabilité des structures [7]. D'autres travaux plus récents ont fait l'étude du durcissement cyclique de matériaux. Le nickel monocristallin soumis à une traction répétée avec un rapport cyclique de 0,25, présente un durcissement cyclique significatif dépendant de la fréquence de chargement et du nombre de cycle [8]. L'expérimentation menée pour deux valeurs de fréquences 0,2 Hz et 20 Hz, montre que les chargements à petites fréquences sont plus durcissants que celle à grandes fréquences. Par contre, une diminution de fréquence entraîne une diminution de la limite de fatigue.

Nely Point et al. [9], ont montré à l'aide de simulations numériques que

quoique la fonction de durcissement est linéaire, l'évolution du comportement contrainte-déformation est non linéaire, ce qui traduit une corrélation entre les variables de durcissement.

Dans le cas de chargement non proportionnel de fatigue oligocyclique, des méthodes approximatives peuvent être utilisées pour déterminer le niveau d'écrouissage maximal à partir de l'analyse des courbes de déformation des matériaux métalliques [10].

La teneur en éléments d'addition peut être à l'origine de l'évolution du durcissement [11]. Pour l'alliage d'aluminium AS9U3G, la haute teneur de Si, Fe et Mn, réduit d'une manière significative la durée de vie en fatigue. Un recuit de vieillissement à 32 °C pendant 100h augmente la durée de vie et le durcissement cyclique secondaire correspondant à un accroissement des contraintes résiduelles dues à la formation des dislocations hétérogènes [11].

Les différents résultats montrent que les caractéristiques mécaniques des alliages étudiés dépendent fortement des conditions de traitement thermique, la contrainte maximale étant obtenue dans le cas des éprouvettes trempées; on observe en outre une réponse stable aux sollicitations cycliques. Pour les états pré-écroui et recuit, on assiste à un écrouissage cyclique important pendant tout le cycle de chargement.

Le présent article est une étude des lois de comportement monotone et cyclique de deux nuances d'aluminium, le 1200 et le 5005, produits au Cameroun. Ces deux nuances présentent de bonnes propriétés de mise en forme, ce qui explique leur grande utilisation dans la région.

L'étude expérimentale a été conduite sous sollicitations quasi-statiques ou variables à amplitude constante [12]. Les résultats obtenus permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques statiques en traction et en compression des nuances étudiées, de tracer leurs courbes d'écrouissage monotone et cyclique ainsi que d'obtenir les différents coefficients d'écrouissage.

2. Procédure expérimentale

2-1. Éprouvettes

Les éprouvettes ont été prélevées dans des tôles d'aluminium produites à Edéa (Cameroun), de dimensions en mm, 750x175x25 et dans le sens du laminage (**Figure 1**).

La nuance 1200 est non alliée alors que l'alliage 5005 a comme élément majeur d'addition le magnésium (**Tableau 1**).

La partie toroïdale des éprouvettes présente un rayon de 110 mm, générant une très faible concentration de contrainte ($K_t = 1,03$) (**Figure 2**).

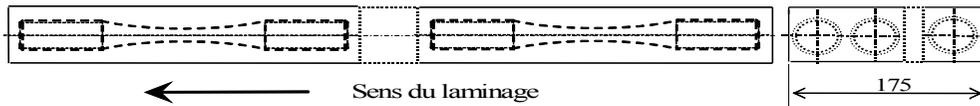


Figure 1 : Prélèvement des éprouvettes dans la tôle d'aluminium

Tableau 1 : Composition chimique des alliages (données en % du laboratoire de l'entreprise Socatral ¹)

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Va	Ti	B	N
1200	0,5347	0,2495	0,0021	0,0028	0,0009	0,0022	0,0025	0,013	0,0051	0,0001	0,0006
5005	0,4699	0,1372	0,0013	0,0046	0,7291	0,0018	0,0037	0,0089	0,0114	0,0012	0,0004

¹ Société Camerounaise de Transformation de l'Aluminium

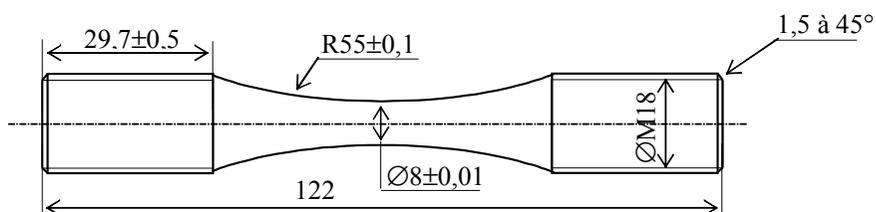


Figure 2 : Éprouvette de caractérisation mécanique

2-2. Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés sur une machine de fatigue de traction-compression Zwick, équipée d'un servomoteur à commande numérique et d'un dispositif d'acquisition de données en temps réel.

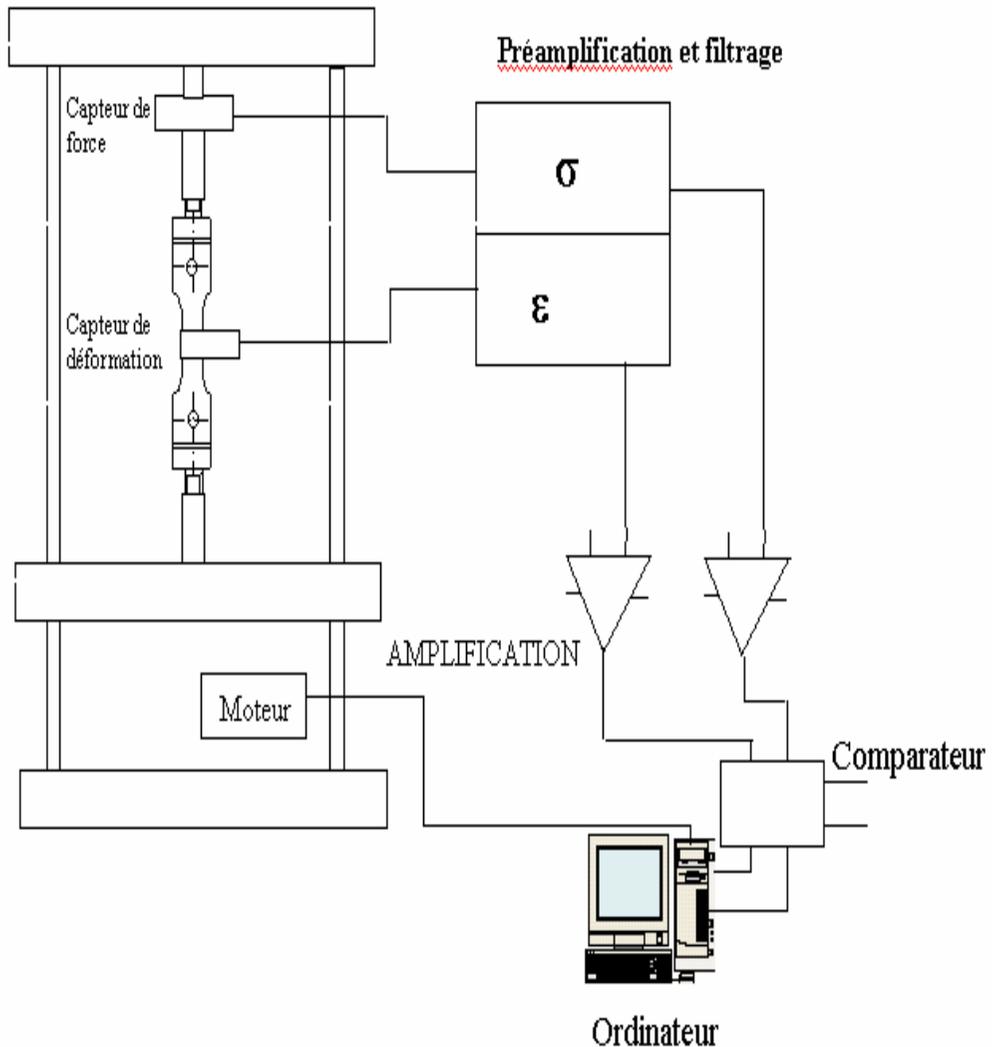


Figure 3 : Architecture du dispositif de pilotage de la machine de traction-compression

Ces dispositifs de commande et d'acquisition ont été installés et étalonnés au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'ENSP de Yaoundé (Cameroun) [12,13] (**Figure 3**).

3. Résultats et discussion

3-1. Caractéristiques mécaniques statiques

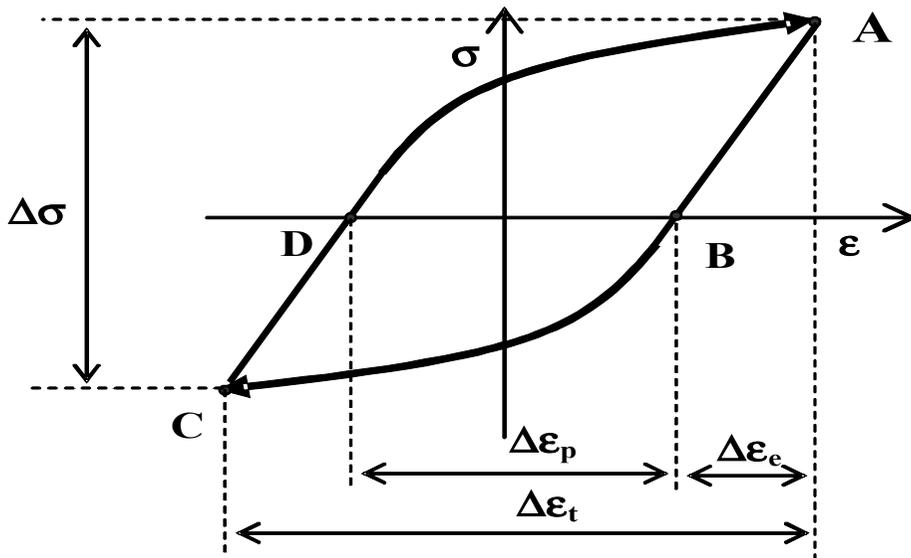
Les essais sous sollicitation monotone ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques statiques des deux matériaux (**Tableau 2**) : limite d'élasticité à 0,02 % $R_{e0,02}$, résistance maximale en traction R_{mt} , ou en compression R_{mc} , allongement pourcent A %, coefficient de striction Z, module d'Young E et coefficient de Poisson ν . Les résultats présentés sont une moyenne établie à partir des résultats d'essais sur 4 éprouvettes.

Tableau 2 : *Caractéristiques mécaniques statiques*

	$R_{e0,02}$ (MPa)	R_{mt} Traction (MPa)	R_{mc} Compression (MPa)	A% (base de 50 mm)	Z (%)	E (MPa)	ν
1200	70	109	98	23,27	79,69	66 625	0,37
5005	41	90	117	28,1	81,84	70 125	0,43

3-2. Caractéristiques mécaniques cycliques

Les caractéristiques recherchées en écrouissage cyclique sont définies par les points particuliers de la courbe d'hystérésis obtenue dans le repère contrainte-déformation après dépassement du seuil d'écoulement initial (**Figure 4**).



A : Contrainte maxi en traction B : compression, point à contrainte nulle
 C : Contrainte maxi en compression D : traction, point à contrainte nulle.

Figure 4 : Réponse théorique d'un matériau à un cycle de contrainte

La courbe de réponse élasto-plastique de l'alliage 5005 durant les premiers cycles de la sollicitation appliquée à amplitude de déformation constante se stabilise au bout d'une douzaine de cycles (**Figure 5**).

Les courbes d'érouissage monotone et cyclique sont obtenues pour les deux nuances d'aluminium 5005 (**Figure 6**) et 1200 (**Figure 7**) respectivement, en fonction de la déformation totale imposée pour l'érouissage monotone et de l'amplitude de la déformation totale sous sollicitation cyclique. Les points de la courbe d'érouissage cyclique représentent les cycles stabilisés pour différents niveaux de la déformation imposée.

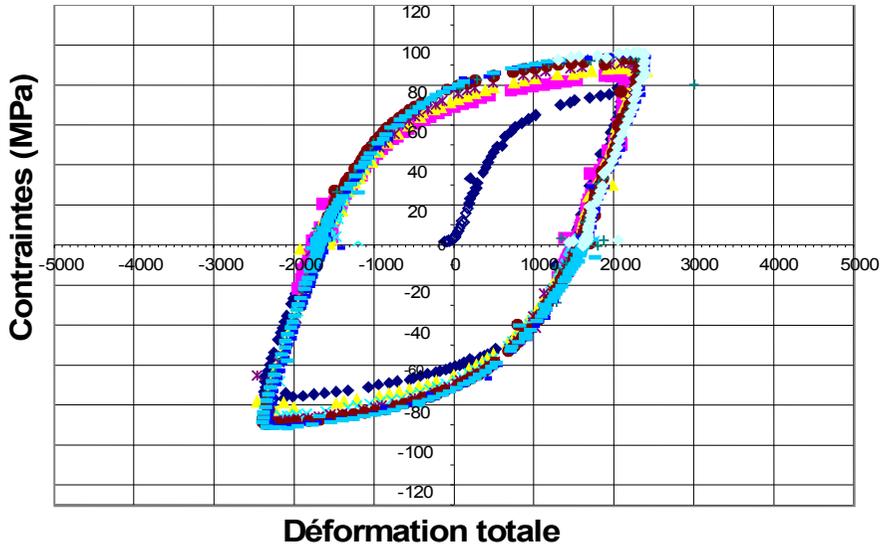
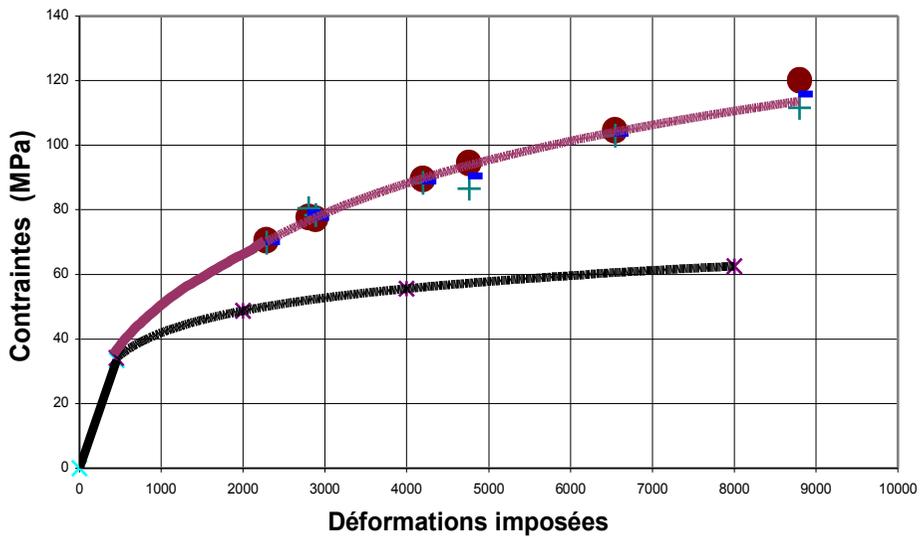
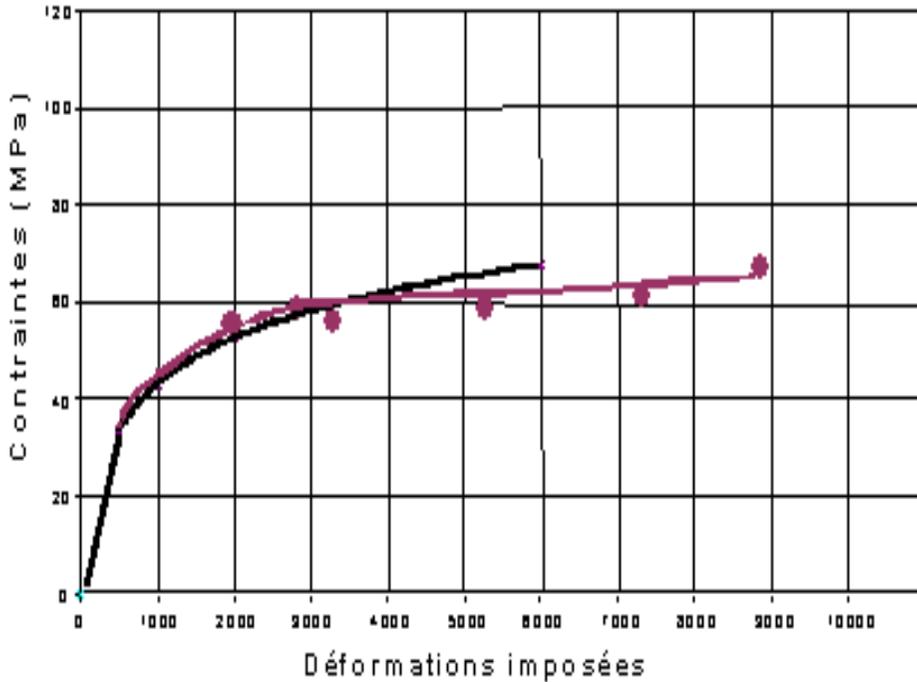


Figure 5 : Réponse expérimentale de l'aluminium 5005, (amplitude de déformation constante égale à $6548 \cdot 10^{-6}$)



— Courbe de traction monotone — Courbe d'érouissage

Figure 6 : Courbes d'érouissage monotone et cyclique de l'aluminium 5005



— Courbe de traction monotone — Courbe d'écroissage

Figure 7 : Courbes d'écroissage monotone et cyclique de l'aluminium 1200

4. Modélisation du comportement cyclique

Les deux alliages d'aluminium étudiés font parties des séries 1000 et 5000 des alliages non durcissables par traitement thermique. Pour ces catégories de matériaux, il est donc intéressant de pouvoir obtenir, quand cela est possible, un durcissement par une action mécanique. L'écroissage en l'occurrence fournit cette possibilité.

Les courbes de variation de l'amplitude de contrainte en fonction de la déformation plastique (exprimée en pourcent) dans un repère à échelles logarithmiques [$\text{Log} (\Delta \epsilon_i \%) - \text{Log} (\Delta \sigma)$] sont représentées par un modèle linéaire (**Figures 8 et 9**).

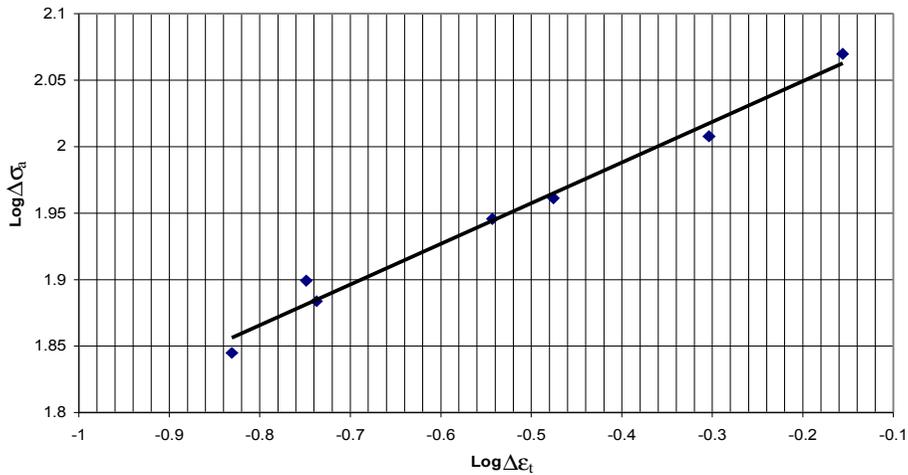


Figure 8 : Amplitude des contraintes en fonction de l'amplitude des déformations plastiques-aluminium 5005

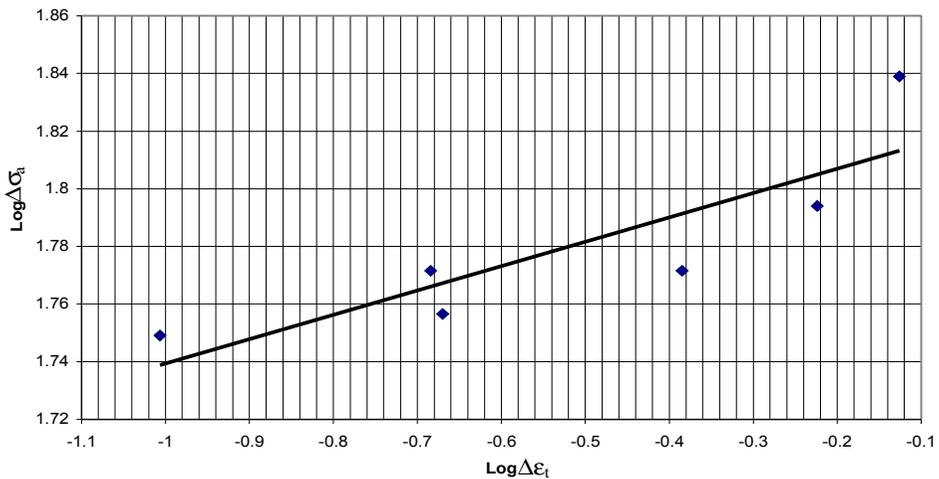


Figure 9 : Amplitude des contraintes en fonction de l'amplitude des déformations plastiques-aluminium 1200

La linéarité de la répartition des points expérimentaux de la nuance 5005 (**Figures 8**) suggère les modélisations suivantes (obtenues par régression linéaire) :

- pour l'aluminium 5005

$$\text{Log}\sigma_a = 0,03018\text{Log}(\varepsilon^p) + 2,1089 \quad (3)$$

(avec un coefficient de corrélation R tel que $R^2 = 0,987$)

Mis sous la forme classique du modèle d'Hollomon, cette relation conduit à :

$$\sigma_a = 8,2392 \cdot \varepsilon^p{}^{0,3018} \quad (4)$$

Les paramètres de la loi d'érouissage cyclique ($\sigma_a = k\varepsilon^{p n'}$) sont ainsi identifiés:

$k = 8,2392$ et $n' = 0,3018$ (exposant de la loi).

L'observation du durcissement cyclique (**Figure 6**) est traduite par une augmentation de l'amplitude de contraintes avec la déformation plastique générée par la déformation totale cyclique imposée.

- pour l'aluminium 1200

Une démarche analogue à celle présentée pour l'aluminium 5005 est conduite. L'expression obtenue qui régit la relation entre l'amplitude de contrainte et la déformation plastique est, pour l'aluminium 1200 :

$$\sigma_a = 6,1651 \cdot \varepsilon^p{}^{0,0675} \quad (5)$$

Le coefficient de corrélation est loin de l'unité. Pour améliorer cette corrélation, utilisons la méthode des moindres carrés pondérés. Elle consiste à réduire l'effet des points aberrants en leur attribuant un poids plus petit, fonction de l'éloignement d du point (ordonnée) de l'ajustement par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO). Si y est l'ordonnée d'un point donné, y_0 l'ordonnée correspondant à son abscisse sur la droite d'ajustement par MCO, le double système de pondération est établi de la manière suivante [12] :

$$p = (1 - v^2)^2 \quad \text{si } |v| \leq 1 \quad (6)$$

$p = 0$ si $|v| > 1$ avec $|v|$ où S est une mesure globale de dispersion ou d'étendue (étendue interquartile de tous les écarts d).

Les valeurs améliorées données par le nouvel ajustement permettent de réécrire :

$$\sigma_a = 1,811 \cdot \varepsilon^{0,0675} \quad (7)$$

(avec un coefficient de corrélation R telle que $R^2 = 1$)

L'exposant n' ($n' = 0,0675$) de la loi d'écrouissage est ici nettement plus faible que dans le cas de l'aluminium 5005 où $n' = 0,3018$. On ne constate pas de durcissement cyclique, les courbes d'écrouissage monotone et d'écrouissage cyclique sont très voisines (**Figure 7**).

5. Conclusion

Ce travail a permis de modéliser l'écrouissage de deux alliages d'aluminium, le 1200 et le 5005 pour lesquels les fonctions d'écrouissage ont été établies.

Le comportement du 1200 est à quelques considérations près prévisible (durcissement au début de la courbe, et adoucissement pour le reste). Tous les deux alliages étant pré-écrouis, la forte présence de magnésium (Mg) dans le 5005 serait la cause de ce durcissement.

Dans un premier temps, l'écrouissage cyclique du 1200 présente un aspect semblable à un durcissement mais avec un faible taux. Les deux courbes cyclique et monotone sont presque confondues avec des valeurs légèrement supérieures pour la cyclique.

Dans un second temps, la courbe d'écrouissage cyclique passe en dessous de la courbe de traction monotone. Nous sommes donc en présence d'un cas d'instabilité de durcissement dû certainement à l'état pré-écroui du matériau. Le pré-écrouissage est donc à l'origine de l'instabilité du durcissement observé pour l'alliage 1200, son comportement n'est donc pas facile à maîtriser.

L'alliage d'aluminium 5005 a un coefficient d'écrouissage significatif. Il est proche de celui de l'acier inoxydable Z3 CND 17 -12, $n' = 0,395$ hyper-trempé mais l'ordre de grandeur de leurs résistances ne sont bien sûr pas du tout comparables. L'acier 35 NCD 16 (état revenu à 500°C, pendant 4h) présente un coefficient d'écrouissage cyclique $n' = 0,122$.

On comprend bien que les propriétés mécaniques de l'aluminium sont fonction de sa pureté et de son mode d'élaboration (corroyage, écrouissage, traitement de recuit final, etc.).

Références

- [1] - G. K. Quainoo, S. Yannacopoulos and A. K. Gupta. *Can. Metal. Quart.*, vol. 40, N°2 (2001) 211-219.
- [2] - Bruno Chenal and Julian Driver. *Techniques de l'Ingénieur, Traité matériaux métalliques*, M230 Editions T.I. *Sciences et Techniques*. (1999), 18 p.
- [3] - A. B. Lopes, F. Barlat, J. J. Gracio, J. F. Ferreira Duarte and E. F. Rauch. *Int. Journal of Plast.*, Vol. 19 (1) (2003) 1-22.
- [4] - A. J. R. Inigoraj, R. Narayanasamy and K. S. Pandey. *Journal of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 84, Issues 1-3 (1998) 143-148.
- [5] - G. F. Dirras, J. -L. Duval and W. Swiatnicki. *Mat. Sc. and Eng. A*, Vol. 263, Issue 1, (1999) 85-95.
- [6] - F. Ellyin, Z. Xia and G. Meijer. *Comp. Sc. and Tech*. Vol. 57, Issue 2, (1997) 237-248.
- [7] - J. M. Meininger, S. L. Dickerson and J. C. Gibeling. *Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct.*, 19 (1) (1996) 85-97.
- [8] - B. Moser, T. Hanlon, K. S. Kumar, S. Suresh. *Scripta materialia*, 54 (2006) 1151-1155.
- [9] - N. Point, S. Erlicher. *App. and comp. Mech.*, Vol 23 (2005) 201-209.
- [10] - M. V. Borodii. *Journal strength of mat.*, Vol 38, N°2 (2006) 128-134.
- [11] - D. Ovono OV Onoa, I. Guillot, D. Massinon. *Journal of alloys & compound*. Elsevier (2006)., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.11.052>
- [12] - G. F. Anago. Endommagement par fatigue de l'aluminium : Cas des alliages 1200 et 5005, *Thèse de doctorat de l'Université nationale du Bénin*, (2000) 184 p.
- [13] - B. D. Soh Fotsing. Modélisation des structures anisotropes à la fatigue – Application au matériau bois, *Thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique de Yaoundé*, N° 08 / ENSP (2000), 174 p.