

Fatigue gigacyclique des matériaux métalliques investiguée par des essais ultrasoniques : effets de fréquence, matériaux et mécanismes

V. Favier

Laboratoire PIMM, ENSAM CNRS CNAM

Résumé

L'évaluation de la résistance à la fatigue dans le domaine gigacyclique ($N_R > 10^7$ cycles) nécessite des temps d'essais extrêmement longs avec des machines de fatigue classiques (presque 4 mois d'essais pour atteindre 10^9 cycles à 100 Hz). Les machines ultrasoniques produisent des cycles à 20 kHz, ce qui permet de réduire le temps d'essai à 1 jour. Néanmoins, l'utilisation de ces machines pose la question de l'influence de la fréquence des essais sur la résistance et le nombre de cycles à rupture en fatigue. Dans l'exposé, des courbes S-N obtenues par essais sur machine ultrasonique sur des métaux différents (cuivre, laiton α , fer α , acier C45, acier DP600) sont présentés. Elles sont mises en regard de courbes S-N obtenues sur des machines conventionnelles. Les effets de fréquence et les mécanismes associés sont discutés.

Mots clés : fatigue gigacyclique ; structure cubique centrée ; structure cubique à faces centrées ; machine ultrasonique ; auto-échauffement ; dislocations.

1. Introduction

Depuis quelques années, des considérations économiques et environnementales poussent les industriels à retarder le remplacement de certaines structures, ce qui conduit à l'utilisation de ces dernières au-delà du temps initialement prévu lors de leur conception. Il est aujourd'hui courant de trouver des structures sollicitées au-delà de 10 millions de cycles et parfois au-delà du milliard de cycles. Ce domaine est appelé fatigue gigacyclique ou fatigue à très grand nombre de cycles (Very High Cycle Fatigue ; $N_R > 10^7$ cycles). Caractériser la résistance en fatigue dans le domaine gigacyclique est donc essentiel. L'évaluation de la résistance à la fatigue dans ce domaine nécessite des temps d'essais extrêmement longs avec des machines de fatigue classiques (~4 mois d'essais pour atteindre 10^9 cycles à 100 Hz). Le développement de machines de fatigue ultrasonique, utilisant des systèmes piézoélectriques et produisant des cycles à 20 kHz, a permis de considérablement réduire la durée des essais puisqu'il faut seulement 1 jour pour atteindre 10^9 cycles. Néanmoins, l'utilisation de ces machines pose la question de l'influence de la fréquence des essais sur la résistance et le nombre à rupture à rupture en fatigue. La question des effets de fréquence sur les courbes S-N est d'actualité et reste très controversée. Certains matériaux ne présentent pas ou peu d'effet de fréquence : c'est le cas par exemple de l'alliage de nickel Udimet 500 (CFC) utilisé dans les moteurs de turbines à gaz [1] et du titane (HC) utilisé dans l'aéronautique et l'automobile [2]. D'autres matériaux sont sensibles à la fréquence : c'est le cas par exemple du tantale (CC) utilisé dans les centrales nucléaires [2] et d'un acier à 0,13 % de carbone [3]. En 2007 dans le cadre de ce même colloque sur le thème « Fatigue des Matériaux et des Structures », André Galtier et Philippe Cugy ont souligné l'effet de fréquence sur l'acier HLE 690 et ont montré qu'il était attribué à un effet de vitesse de déformation [4]. Cet argument est très souvent donné dans la littérature. Mais est-ce le seul ? Dans la suite de l'exposé, des résultats de fatigue obtenus à différentes fréquences, différentes températures et sur différents matériaux métalliques sont présentés pour contribuer à répondre à cette question. Ils ont

été obtenus dans le cadre du projet ANR DISFAT et des thèses d'Antoine Blanche co-encadrée par A. Chrysochoos et N. Ranc [5], de Ngoc Lam Phung co-encadrée par V. Favier et N. Ranc [6], de Nicolas Marti co-encadrée par V. Favier, N. Saintier et F. Grégori [7] et Chow Wang co-encadrée par D. Wagner et C. Bathias [8], d'un projet financé par la Fondation CETIM, en collaboration avec G. Thoquenne et F. Lefebvre, et de la thèse de Noushin Torabian en co-tutelle avec l'Université d'Isfahan en Iran, co-encadrée par V. Favier, S. Ziaei-Rad, J. Dirrenberger et F. Adamski.

2. Procédure expérimentale

2.1 Machine de fatigue ultrasonique

Le principe d'un essai de fatigue sur une machine ultrasonique consiste à faire vibrer une éprouvette à haute fréquence. Les essais les plus classiques réalisés avec cette technique sont les essais de traction-compression avec un rapport de charge $R = -1$. Le système se compose principalement de quatre éléments placés en série :

- un convertisseur électrique qui transforme le signal 50 Hz en un signal sinusoïdal à 20 kHz.
- un convertisseur piézoélectrique alimenté par le générateur qui transforme le signal électrique en onde mécanique longitudinale de même fréquence et dont l'amplitude peut varier entre 1 et 15 μm .
- une sonotrode qui amplifie ou atténue l'amplitude de l'onde afin d'obtenir la gamme d'amplitudes de contrainte désirée au centre des éprouvettes.
- l'éprouvette soumise au chargement créé par l'onde mécanique.

Les sonotrodes et les éprouvettes sont excitées à 20 kHz et sont donc dimensionnées pour vibrer longitudinalement (traction-compression) à cette fréquence. En régime permanent une onde stationnaire de fréquence 20 kHz s'établit dans l'ensemble du système ; les ventres de vibration sont situés entre les éléments et les contraintes γ sont nulles. La *Figure 1* donne les allures des amplitudes de déplacement et de contrainte dans le système en régime permanent. Celles-ci ont été obtenues avec un calcul fréquentiel en élasticité. En effet, à l'échelle macroscopique le comportement de l'éprouvette est considéré élastique car les déformations résiduelles mesurées après essais sont inférieures à 0,02 %. Dans le cas des essais de fatigue ultrasonique, c'est l'amplitude de déplacement en sortie de sonotrode u_s qui est imposée ce qui revient à travailler à déformation totale imposée. C'est en jouant sur le paramètre u_s que l'amplitude de contrainte souhaitée au centre des éprouvettes est obtenue. Le système est étalonné avec un vibromètre laser afin de faire le lien entre la tension appliquée au convertisseur piézoélectrique et le déplacement au niveau de l'extrémité de la sonotrode.

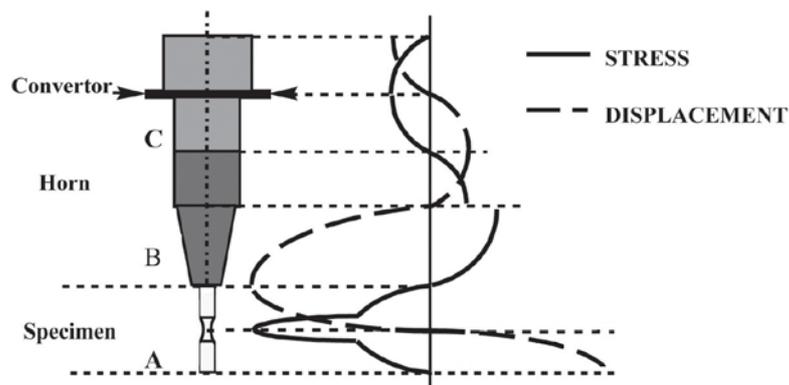


Figure 1. Allures des amplitudes de déplacement et de contrainte dans le système en régime permanent. Adapté de [1].

Deux technologies de machines ultrasoniques sont disponibles dans la littérature : les machines développées par C. Bathias [1] où la sollicitation est appliquée en continue pendant toute la durée de

l'essai et les machines dites à pulses développées par S. Stanzl-Tschegg [9] fonctionnant par blocs de cycles afin de favoriser les pertes calorifiques. À une fréquence de travail de 20 kHz les éprouvettes s'échauffent. Pour s'affranchir des effets de la température, un système de refroidissement par convection forcée pendant les essais est généralement utilisé. Comme montré dans la littérature [10] [11] [12] et comme nous le verrons dans l'exposé, l'auto-échauffement des éprouvettes dans le cas de certains matériaux est impossible à éliminer quels que soient les systèmes utilisés. Dans les études présentées dans la suite, nous avons utilisé une machine ultrasonique fonctionnant en continue. Les courbes S-N ont été obtenues grâce à des essais avec un refroidissement par convection forcée à l'air. La température au cours des essais a été mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge. La valeur moyenne de la température au centre de l'éprouvette où l'amplitude de contrainte est maximale a été calculée pour déterminer l'auto-échauffement.

2.2 Matériaux

Le comportement en fatigue de différents matériaux a été étudié. Le cuivre et le laiton α sont des polycristaux monophasés à structure cubique à faces centrées (CFC). Le fer est un polycristal monophasé à structure cubique centrée (CC). L'acier C45 ferrito-perlitique et l'acier dual phase DP600 ferrito-martensitique sont des polycristaux biphasés contenant une phase ferritique de limite d'élasticité inférieure à celle de l'autre phase donc qui accommode majoritairement les déformations imposées lors des essais de fatigue.

3. Résultats

3.1 Courbes S-N et auto-échauffement

La *Figure 2* représente les courbes S-N obtenues par essais de fatigue sur machine ultrasonique travaillant à 20 kHz pour le fer α , le laiton α et le cuivre. Pour les trois matériaux, on constate une forme de courbes similaire et l'absence d'asymptote horizontale jusqu'à 10^{10} cycles. Pour des besoins de comparaison entre matériaux, une limite d'endurance de référence σ_D , correspondant à la résistance en fatigue à 10^9 cycles est définie pour les trois matériaux. Elle est prise égale à 90 MPa pour le cuivre, 164 MPa pour le laiton α et 190 MPa pour le fer α . Dans le cas d'essais non refroidis, pour des amplitudes de contraintes comprises entre 42% to 66% de σ_D , l'auto-échauffement à 10^7 cycles est trouvé inférieur à 20°C dans le cas du cuivre, inférieur à 90°C dans le cas du laiton α et inférieur à 80°C dans le cas du fer α [13].

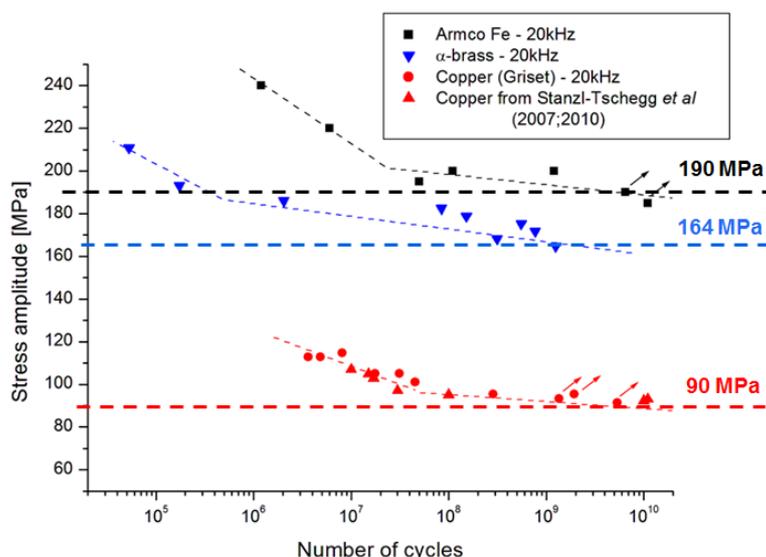


Figure 2. Courbes S-N obtenues par essais de fatigue sur machine ultrasonique pour du fer α , du laiton α et du cuivre (adapté de [13]).

Dans le cas des aciers biphasés C45 ferrito-perlitique [14] et l'acier Dual Phase DP600 [15], des auto-échauffements beaucoup plus importants et atteignant plusieurs centaines de degrés ont été observés, même dans le cas d'essais menés avec un système de refroidissement et conduisant à la rupture. Ces fortes températures posent la question de leurs effets sur la réponse en fatigue.

3.2 Courbes S-N et effet de fréquence

La *Figure 3* représente des résultats obtenus après des essais de fatigue sur machine ultrasonique à 20 kHz et sur machine conventionnelle à des fréquences inférieures à 100 Hz dans le cas du cuivre. Deux types de résultats sont montrés : les courbes S-N et les courbes dites des premières bandes de glissement (slip bands SB) apparaissant à la surface des éprouvettes. On constate clairement un effet de fréquence sur ces deux courbes : pour une amplitude de contrainte donnée, le nombre de cycles nécessaire pour voir apparaître les premières bandes et le nombre de cycles à rupture sont plus grands à 20 kHz qu'à 100 Hz. Pour un nombre de cycle donné, l'amplitude de contrainte pour voir apparaître les premières bandes ou conduire à la rupture est plus élevée à 20 kHz qu'à 100 Hz.

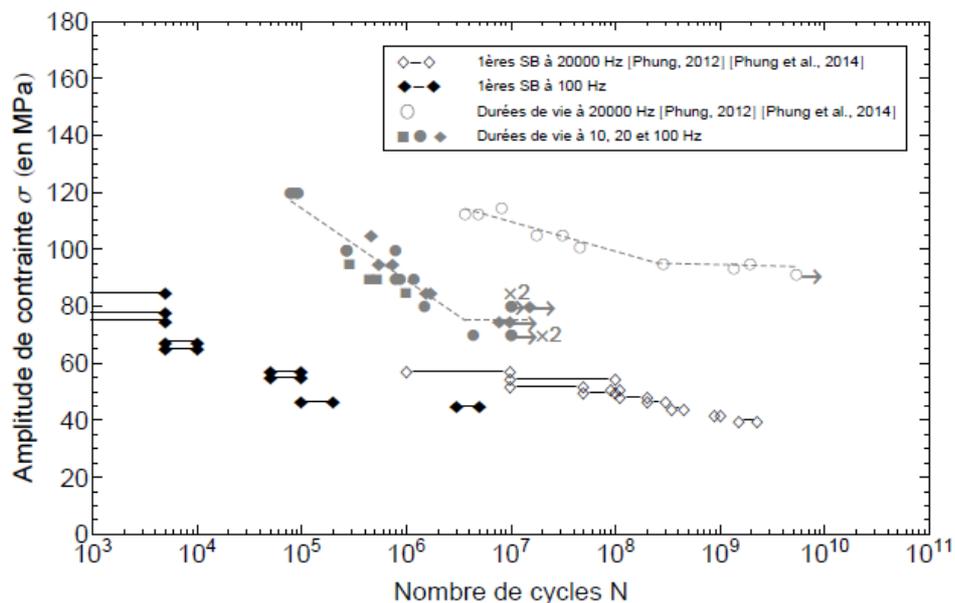


Figure 3. Essais de fatigue sur machine ultrasonique à 20 kHz et sur machine conventionnelle à des fréquences <100 Hz réalisés sur du cuivre. Courbes S-N et courbes des premières bandes de glissement (slip bands SB) apparaissant à la surface des éprouvettes [7].

Dans le cas des aciers biphasés C45 [14] et DP600 [15], on constate également un nombre de cycle à rupture plus grand à 20 kHz qu'à basses fréquences pour une amplitude de contrainte donnée. En revanche, il est difficile de conclure sur une augmentation de la résistance en fatigue entre 20 kHz et les basses fréquences. Plus de détails sur le comportement du DP600 sont proposés dans le poster de Noushin Torabian [16] présenté à ce colloque. Par ailleurs, on rappelle que les essais à 20 kHz sont accompagnés d'un auto-échauffement de quelques centaines de degrés.

4. Discussion

4.1 Régime thermiquement activé et régime athermique

Les métaux de structure cubique centrée, comme le fer α ou la phase ferritique de l'acier C45 et du DP600, présentent un comportement plastique fortement sensible à la température et à la vitesse de déformation lorsque la température de sollicitation est inférieure à une température dite de

transition T_0 . Ce régime de température est appelé régime thermiquement activé et est lié à la présence d'une forte friction de réseau pour les dislocations vis qui, de ce fait, sont très peu mobiles par rapport aux dislocations coins. Au-dessus de T_0 , la mobilité des dislocations vis devient équivalente à celle des dislocations coins et on passe à un régime athermique pour lequel le comportement devient peu sensible à la vitesse de déformation et à la température. Dans le cas du fer α et des aciers bas carbone, T_0 est de l'ordre de la température ambiante pour des vitesses de déformation variant entre 1 s^{-1} et 10 s^{-1} [17] mais augmente avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Campbell et Fergusson [18] ont montré, dans le cas d'un acier contenant 0.12 wt% de carbone, que T_0 était décalée à 130°C-400°C pour des vitesses de déformation variant entre 10 s^{-1} to 100 s^{-1} . Les métaux de structure cubique à faces centrées, comme le cuivre et le laiton α , ne présentent pas cette particularité et les dislocations vis et coins présentent la même mobilité dans une très large gamme de température. On est donc toujours dans un régime athermique pour lequel le comportement est peu sensible à la vitesse de déformation et à la température.

4.2 Cas du cuivre, structure cubique à faces centrées

Dans le cas du cuivre, nous avons vérifié que l'effet de fréquence mis en évidence sur la *Figure 3* ne pouvait pas être expliqué seulement par un effet de sensibilité à la vitesse de déformation car celui-ci est trop faible. La formation des bandes de glissement à la surface des éprouvettes prouve que le glissement cristallographique est en partie irréversible lors d'un cycle [19]. Cette irréversibilité est facilitée par le glissement dévié [20]. Ce dernier est lui-même facilité par la température et par le temps laissé à son activation. A l'aide d'un modèle simple [7], nous avons pu montrer que la probabilité d'activer le glissement dévié au cours d'un cycle est plus élevée à 100 Hz qu'à 20 kHz. Ainsi, les bandes de glissement se forment et apparaissent pour un plus faible nombre de cycles à 100 Hz qu'à 20 kHz. Les fissures s'amorçant sur les bandes de glissement à cause de leur rugosité et les concentrations de contrainte qu'il en résulte, la rupture apparaît également à des nombres de cycles plus faibles à 100 Hz qu'à 20 kHz.

4.3 Cas de la phase ferritique, structure cubique centrée, dans des aciers,

Etant donné les amplitudes de contraintes mises en jeu, les essais réalisés à 20 kHz induisent des essais à vitesses de déformation comprises entre 10 s^{-1} to 100 s^{-1} alors que ceux réalisés à basses fréquences ($\sim 30 \text{ Hz}$) sont de l'ordre de 0.2 s^{-1} . Ainsi comme mentionné dans la section 4.1, la température de transition entre les régimes thermiquement activé et athermique est décalée de la température ambiante pour les essais à basses fréquences à 130°C-400°C pour les essais à 20 kHz. Tant que l'auto-échauffement reste inférieur à 130°C, le comportement est donc thermiquement activé. C'est le cas du fer α lorsque l'auto-échauffement reste inférieur à 80°C [13] et de l'acier DP600 pour des amplitudes de contraintes inférieures à 250 MPa [15]. Pour des échauffements de quelques centaines de degrés, les mécanismes de déformation deviennent athermiques.

5. Conclusion

L'étude de la fatigue gigacyclique est aujourd'hui accessible et peu coûteuse grâce au développement des machines ultrasoniques travaillant à 20 kHz. Néanmoins, les hautes fréquences de sollicitation induisent des effets de vitesse de déformation, de température et de temps qui dépendent des matériaux et qui sont importants de bien comprendre pour une bonne utilisation de ces machines.

Remerciements

Nous remercions très sincèrement Bastien Weber d'ArcelorMittal pour nous avoir fourni des tôles d'aciers DP600 et la société Griset des tôles de cuivre et de laiton α . Les résultats présentés sur les

différents matériaux ont été réalisés grâce au financement de l'ANR dans le cadre du projet DISFAT ANR-09-BLAN-0025-01, de la fondation CETIM et de la bourse de thèse iranienne de N. Torabian.

Références

- [1] C. Bathias et P. Paris, *Gigacycle fatigue in mechanical practice*, Dekker, M. CRC Press, 2005.
- [2] M. Papakyriacou, H. Mayer, C. Pypen, H. Plenk et S. E. Stanzl-Tschegg, «Influence of loading frequency on high cycle fatigue properties of b.c.c. and h.c.p. metals,» *Materials Science and Engineering A*, vol. 308, pp. 143-152, 2001.
- [3] N. Tsutsumi, Y. Murakami et V. Doquet, «Effect of test frequency frequency on fatigue strength of low carbon steel,» *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 32, pp. 473-783, 2009.
- [4] A. Galtier et P. Cugy, *La fatigue giga-cyclique : faut-il aller plus loin et peut-on aller plus vite ?*, Aussois: Colloque MECAMAT, 2007.
- [5] A. Blanche, «Effets dissipatifs en fatigue à grand et très grand nombre de cycles,» PhD Montpellier University, Montpellier, 2012.
- [6] N. L. Phung, «Fatigue sous très faibles amplitudes de contrainte : analyse des mécanismes précurseurs de l'amorçage de fissures dans le cuivre polycristallin,» Thèse de Doctorat, Paris, 2012.
- [7] N. Marti, «Effet de fréquence sur les mécanismes de microplasticité en fatigue,» PhD Arts et metiers ParisTech, Paris, 2014.
- [8] C. Wang, «Microplasticité et dissipation en fatigue à très grand nombre de cycle du fer et de l'acier,» 2013.
- [9] S. Stanzl-Tschegg, «Ultrasonic fatigue, Encyclopedia of Materials : Science and Technology,» pp. 9444-9449, 2001.
- [10] Y. Yu, J. L. Gu, L. Xu, F. L. Shou, B. Z. Bai et Y. B. Liu, «Very high cycle fatigue behaviors of Mn-Si-Cr series Bainite/Martensite dual phase steels,» *Materials Design*, vol. 31, pp. 3067-3072, 2010.
- [11] W. J. Peng, B. W. Qiu, R. F. Li et H. Xue, «Ultrasonic Fatigue Tests on a High Strength Steel for Welded Structure,» *Advanced Materials Research*, Vols. %1 sur %2503-504, p. 714-717, 2012.
- [12] W. Peng, Y. Zhang, B. Qiu et H. Xue, «A Brief Review of the Application and Problems in Ultrasonic Fatigue Testing,» *AASRI Procedia*, vol. 2, p. 127-133, 2012.
- [13] V. Favier, A. Blanche, C. Wang, N. L. Phung, . N. Ranc, D. Wagner, C. Bathias, A. Chrysochoos et H. Mughrabi, «Very High Cycle Fatigue for single phase ductile materials: comparison between alpha-iron, copper and alpha-brass polycrystals,» *International Journal of Fatigue*, p. submitted, 2016.
- [14] N. Ranc, V. Favier, B. Munier, F. Vales, G. Thoquenne et F. Lefebvre, «Thermal response of C45 steel in high and very high cycle fatigue,» *Procedia Engineering*, vol. 133, pp. 265-271, 2015.
- [15] N. Torabian, V. Favier, S. Ziaei-Rad, J. Dirrenberger, F. Adamski et N. Ranc, «Thermal response of DP600 dual-phase steel under ultrasonic fatigue loading,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 677, pp. 97-105, 2016.
- [16] N. Torabian, V. Favier, J. Dirrenberger, F. Adamski, S. Ziaei-Rad et N. Ranc, «Fatigue behavior of DP600 dual-phase steel under ultrasonic and conventional cyclic loadings,» 2016.
- [17] B. Guennec, A. Ueno, T. Sakai, M. Takashi, Y. Itabashi et M. Ota, «Dislocation-based interpretation on the effect of the loading frequency on the fatigue properties of JIS S15C low carbon steel,» *International Journal of Fatigue*, vol. 70, pp. 328-341, 2015.
- [18] J. D. Campbell et W. G. Ferguson, «The temperature and strain rate dependence of the shear strength of mild steel,» *Philosophical Magazine*, vol. 81, pp. 63-82, 1970.
- [19] H. Mughrabi, «Cyclic slip irreversibility and fatigue life: A microstructure-based analysis,» vol. 61, pp. 1197-1203, 2013.
- [20] C. Déprés, M. Fivel et C. Robertson, «Low-strain fatigue in AISI 316L steel surface grains: a three-dimensional discrete dislocation dynamics modelling of the early cycles I. Dislocation microstructures and mechanical behaviour,» *Philosophical Magazine*, vol. 84, pp. 2257-2275, 2004.