

Fatigue et auto-échauffement sous sollicitation cyclique des alliages à mémoire de forme.

V. LEGRAND^a, L. SAINT-SULPICE^b, L. PINO^b, S. ARBAB CHIRANI^b, S. CALLOCH^a,

a. LBMS, ENSTA Bretagne, 2 rue François verny, 29806 BREST cedex 9

b. LBMS, Enib CS 73862 29238 Brest cedex 3

Résumé :

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux capables de recouvrer une grande déformation réversible (jusqu'à 8%) sous chargement thermomécanique. Le mécanisme de déformation à l'origine de cette capacité est un changement de phase solide/solide du type martensitique. Cet alliage est utilisé pour des applications biomédicales ou dans le domaine du transport. Les AMF sont notamment utilisés pour la réalisation d'instruments endodontiques. Ils sont utilisés par les chirurgiens-dentistes pour réaliser certaines opérations sur les canaux des racines de dents. La propriété super-élastique du Nickel-Titane (NiTi) permet aux instruments de s'adapter parfaitement aux géométries des racines de dents. Lors de ces utilisations les praticiens rencontrent des problèmes de rupture en fatigue des instruments pouvant compliquer l'opération. Or, les propriétés en fatigue sont un domaine peu exploré. Actuellement lors de la phase de conception de structure utilisant cet alliage, la fatigue n'est pas considérée. Les praticiens rencontrent des problèmes de rupture en fatigue qui peuvent compliquer la suite de l'opération. Cette étude commence par la réalisation d'essais de fatigue en traction sur éprouvettes à faible et à grand nombre de cycles. Ainsi nous obtenons des courbes de fatigue classique (amplitude de chargement en fonction du nombre de cycles à rupture). En parallèle nous utilisons une technique dite rapide appelée essais d'auto-échauffement sous sollicitation cyclique pour déterminer les propriétés de tenue à la fatigue de ces matériaux. Ainsi nous pouvons valider la méthode rapide à l'aide d'essais classiques dans l'optique d'étudier l'influence de différents paramètres du procédé de fabrication sur les propriétés en fatigue des instruments.

Abstract:

Shape memory alloys are materials which are able to recover a large inelastic deformation (up to 8%) under thermomechanical loadings. It is due to a solid-solid diffusionless phase transformation called martensitic transformation. This interesting property makes these alloys suitable for the development of original applications in various domains like biomedical, transport, etc. The thermomechanical behavior of these alloys has been studied more and more since last years. These materials can generate different types of behavior. Superelasticity is one of these behaviors which is obtained under isothermal mechanical loading. This effect is widely used in applications. For example it is used for the realization of endodontic instrument. These instruments are used in the dental field to perform some operations on the root canals of teeth. In the case of endodontic instruments, file separation by fatigue can occur and complicates the result of the operation. Unfortunately, the fatigue property of these alloys remains an unexplored area. In this study, we focus on superelastic NiTi fatigue and also the self-heating phenomena. This study begins with a primary phase based on fatigue tests at low and high number of cycles. By this way, Wöhler curves are obtained by conventional techniques for the studied alloy. These tests permit to determine the fatigue mechanisms in these alloys and also to determine the phase transformation effects on the fatigue properties. In parallel, self-heating tests are carried out to determine the fatigue properties of these materials by this fast technique.

Mots clés : alliage à mémoire de forme, superélasticité, fatigue, auto-échauffement, NiTi

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux capables de recouvrer une grande déformation réversible (jusqu'à 8%) sous chargement thermomécanique. Ces propriétés sont dues à un aspect tout à fait particulier du comportement mécanique des AMF : la superélasticité. Lorsque ces matériaux sont sollicités à une température supérieure à leur température caractéristique A_f (ie, austénite finish), ils se déforment de manière « réversible » jusqu'à des niveaux de déformation qui peuvent atteindre 8% à 10%. Le mécanisme de déformation à l'origine de cette superélasticité est basé sur un changement de phase solide/solide du type martensitique (Berveiller et Patoor, 1994 [1]). Les propriétés de cet alliage le rendent intéressant dans un certain nombre d'applications. Il est notamment utilisé pour des applications biomédicales ou dans le domaine du transport. L'effet le plus utilisé dans les applications industrielles est la superélasticité. Il est notamment utilisé pour la réalisation d'instruments endodontiques. Ces instruments sont employés dans le domaine dentaire pour réaliser certaines opérations sur les canaux des racines de dents. La propriété superélastique du NiTi permet aux instruments de s'adapter parfaitement à l'anatomie des racines de dents. Le comportement thermomécanique de ces alliages est étudié depuis quelques années. Ces dernières années plusieurs modèles ont été développés pour décrire son comportement (Saint-Sulpice *et al.* 2009 [2], Zaki *et al.* 2007 [3], Auricchio *et al.* 2007 [4]). En revanche les propriétés en fatigue de ces alliages restent un domaine peu exploré. En effet, actuellement lors de la phase de conception de structure utilisant cet alliage, la fatigue n'est pas considérée. Or, par exemple lors de l'utilisation des instruments, les praticiens rencontrent des problèmes de rupture en fatigue qui peuvent compliquer la suite de l'opération.

Dans cette étude nous nous intéressons donc à la fatigue des alliages de Nickel-Titane (NiTi). Pour cela nous utilisons une méthode rapide développée au laboratoire depuis quelques années appelée essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques (Munier *et al.* 2010 [5]). Cette méthode a été appliquée sur différents matériaux et éprouvettes. Les instruments endodontiques sont usinés dans des fils de NiTi de diamètre compris entre 1mm et 2mm. Nous avons donc dans un premier temps appliqué la méthode aux fils pour voir si on était capable de réaliser les mêmes observations. Une fois la méthode validée sur les fils nous l'avons mise en œuvre sur d'autres fils de NiTi. Nous avons ensuite adapté des éprouvettes à partir de fil pour réaliser des essais de fatigue classique pour valider la méthode. Ainsi une fois cette méthode rapide validée, nous pourrions étudier l'influence de différents paramètres sur les propriétés en fatigue de notre matériau.

2 Essais d'auto-échauffement et de fatigue

2.1 Matériau et éprouvette

Le matériau constitutif des instruments endodontiques est un alliage à mémoire de forme de type NiTi. La limite de début de transformation est de l'ordre de 750MPa et la déformation superélastique associée au changement de phase est d'environ 6%. La figure 1 b présente une courbe de comportement de notre matériau. Nous travaillons sur des éprouvettes « diabolo » (figure 1 a) et l'extensomètre est placé de part et d'autre de notre entaille. De ce fait la déformation n'est pas représentative. En revanche, cette courbe nous permet d'obtenir la contrainte limite de début de transformation.

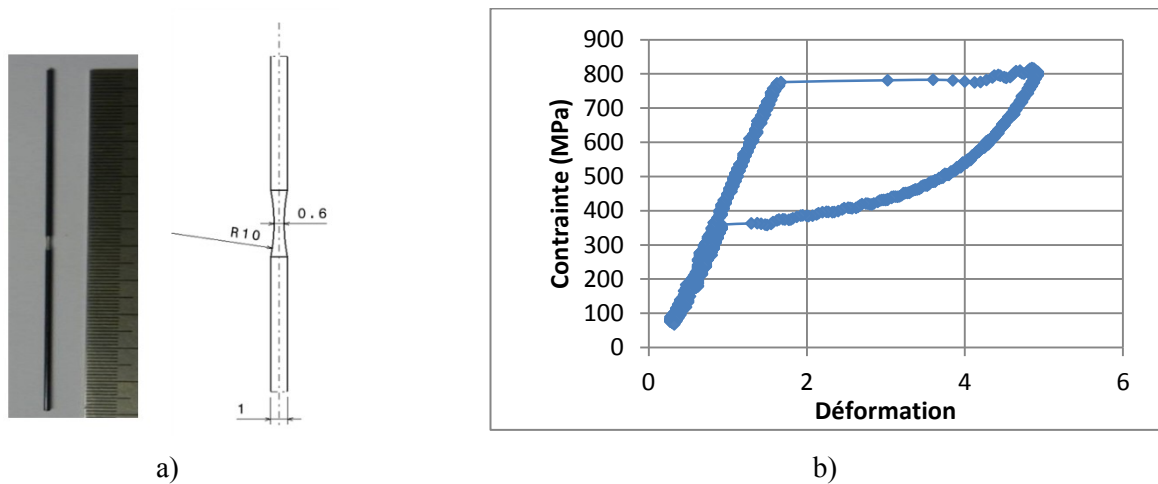


FIG. 1 – a) Epreuve « diablo » b) Courbe de contrainte déformation

Le matériau de l'étude se présentait sous forme de fil. Nous sommes donc partis de fil de NiTi mais la réalisation d'essais de fatigue sur fils pouvant être difficile (problèmes de rupture dans les mors). Nous avons choisi de travailler dans un premier temps avec des éprouvettes « diablo ». Une entaille circulaire est donc réalisée sur les fils. Cet usinage se fait avec le même procédé de fabrication que pour les instruments dentaires. Cette géométrie d'éprouvette nous permet de s'affranchir des problèmes de localisation et d'éviter les problèmes de rupture dans les mors (Figure 1a). Nous travaillons donc sur des fils de diamètre 1mm avec une réduction de section circulaire au centre de diamètre 0,6mm. Sur cette éprouvette « diablo » nous réalisons des essais d'auto-échauffement et de fatigue.

2.2 Essais d'auto-échauffement

Depuis quelques années, une technique a été mise au point pour déterminer les propriétés à la fatigue à grand nombre de cycles des matériaux métalliques à partir d'essais d'auto-échauffement. Cette méthode est basée sur l'observation de l'évolution de la température moyenne stabilisée d'une éprouvette soumise à une séquence de chargement cyclique par blocs. Lors de ce type d'essais on observe, une fois un certain niveau de chargement dépassé, que la température moyenne stabilisée de l'éprouvette augmente de façon significative. Cette augmentation de température est reliée au fait que la limite de fatigue du matériau a été dépassée donnant naissance à des mécanismes dissipatifs. Il s'agit de micro-plasticité dans le cas des métaux classiques [6], [7].

Dans le cas des alliages à mémoire de forme un mécanisme supplémentaire entre en jeu : la déformation réversible associée au changement de phase. Néanmoins nous avons voulu tester cette méthode sur les fils d'AMF.

La quantité de matière en jeu au niveau des éprouvettes diabolos étant faible, nous avons dans un premier temps testé l'auto-échauffement en utilisant des fils de trois matériaux différents. Nous avons commencé par un fil d'acier de diamètre 1mm pour pouvoir comparer nos résultats à des essais classiques d'auto-échauffement. Puis nous avons utilisé un fil de CuAlBe de diamètre 2mm parce que c'est également un AMF. De cette manière nous pouvons observer l'influence du volume sollicité. Et enfin sur un fil de NiTi de diamètre 1mm, qui est l'AMF à l'origine de cette étude. Les essais sont réalisés sur une machine d'essais Bose electroforce de capacité 3kN à une fréquence de 30Hz. L'évolution de la température est suivie grâce à une caméra infrarouge Flir SC7000 dont la résolution thermique est de 20mK.

Le protocole expérimental de l'auto-échauffement se déroule de la manière suivante : sur une même éprouvette nous avons réalisé successivement des blocs de 3000 cycles à des niveaux de chargements de plus en plus grands (par palier de 20MPa). Pour chacun des niveaux de chargement on a relevé l'augmentation de température de l'éprouvette à l'aide d'une caméra infrarouge (Figure 2 a). On a ensuite reporté l'élévation de température en fonction du chargement appliqué pour chaque palier (Figure 2 b) pour obtenir ce que l'on appelle la courbe d'auto-échauffement.

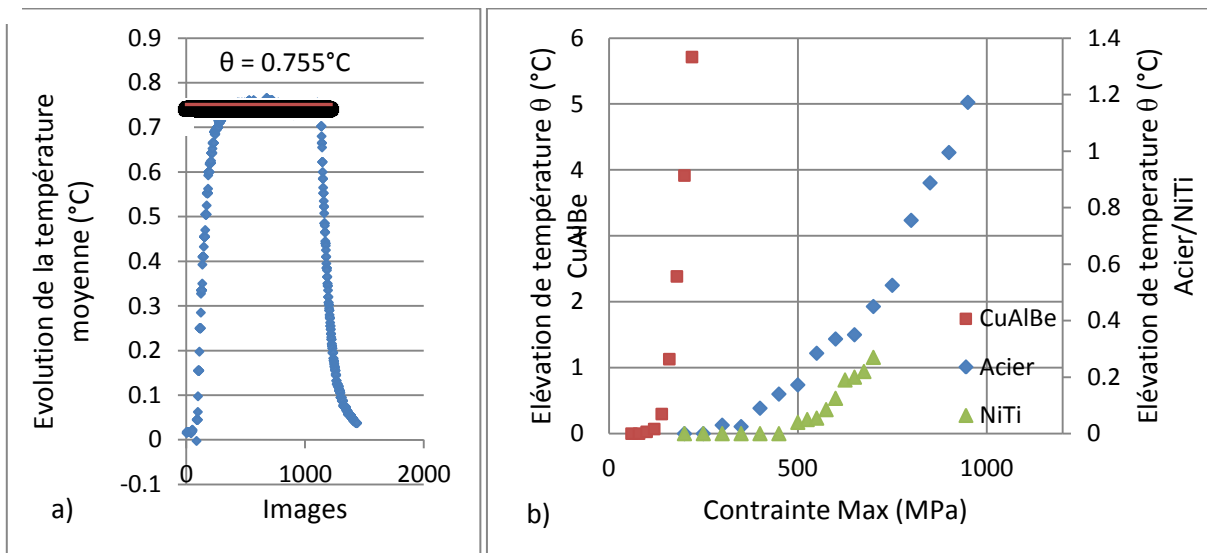


FIG. 2 – a) Evolution de la température lors d'un bloc de chargement de 3000cycles à 800MPa sur un acier.
b) Courbe d'auto-échauffement pour trois matériaux

Dans les trois cas, une augmentation de la température moyenne stabilisée est constatée lorsque l'on vient augmenter le chargement. Ce résultat est similaire à ce que l'on peut obtenir avec des éprouvettes classiques. Notamment sur les éprouvettes en acier où la méthode a été utilisée et comparée à des essais de fatigue classique de nombreuses fois. Nous avons donc décidé d'utiliser cette méthode sur nos fils. Pour mieux contrôler les conditions aux limites nous avons réalisé les essais sur les éprouvettes «diabolos». La figure 3 montre les résultats d'essais d'auto-échauffement sur deux éprouvettes « diabolos »

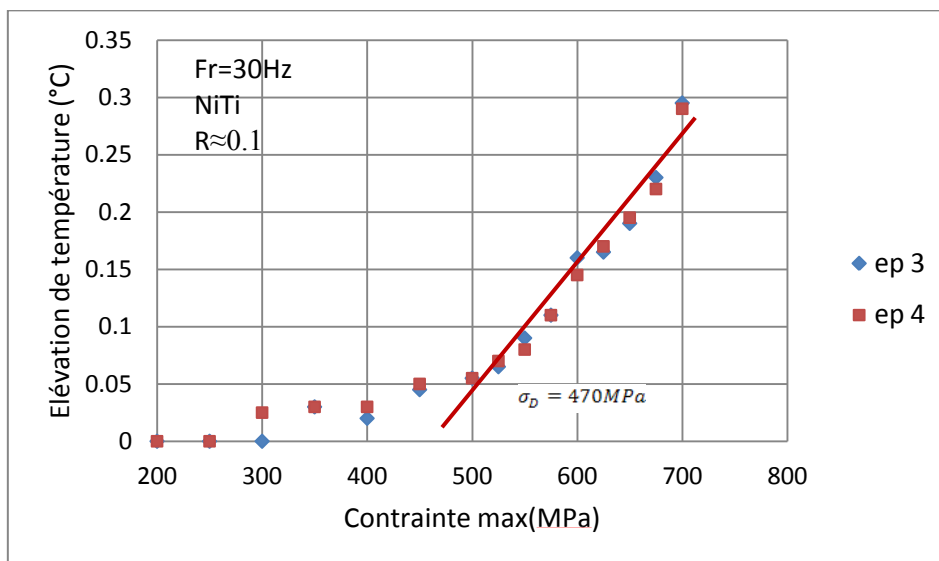


FIG. 3 - Courbe d'auto-échauffement de deux éprouvettes « diabolos »

A nouveau nous remarquons qu'à partir d'un certain point l'élévation de température devient plus significative. Une exploitation empirique de ce type de résultats d'essais montre qu'ils permettent de déterminer de façon rapide, à partir d'un seul essai d'une durée d'environ une heure et ne nécessitant qu'une seule éprouvette, la limite d'endurance du matériau [5]. En traçant une droite passant par les derniers points de la courbe, on obtient la limite d'endurance à l'intersection avec l'axe des abscisses. Dans le cas de notre essai on relève une limite d'endurance de l'ordre de 470 MPa. L'avantage de cette technique est sa rapidité.

2.2 Essais de fatigue classique

Nous avons utilisé le même dispositif expérimental que celui de la section précédente. Tous les essais de fatigue ont été réalisés à une fréquence de 30Hz. Cette fréquence nous permet d'avoir une élévation de température faible n'influençant pas les propriétés mécaniques de nos éprouvettes. Cette fréquence nous permet également d'obtenir une courbe de fatigue relativement rapidement (environ 20heures pour réaliser 2 millions de cycles). Pour réaliser cette courbe nous emmenons chaque éprouvette à rupture à des niveaux de chargement de plus en plus grands (entre 300 et 700 MPa). Cependant si l'éprouvette n'est pas cassée à deux millions de cycles, nous arrêtons l'essai pour ne pas faire durer les essais. Nous reportons ensuite le nombre de cycles appliqués à la rupture en fonction de la contrainte maximum vue par l'éprouvette sur notre courbe de fatigue (Figure. 4).

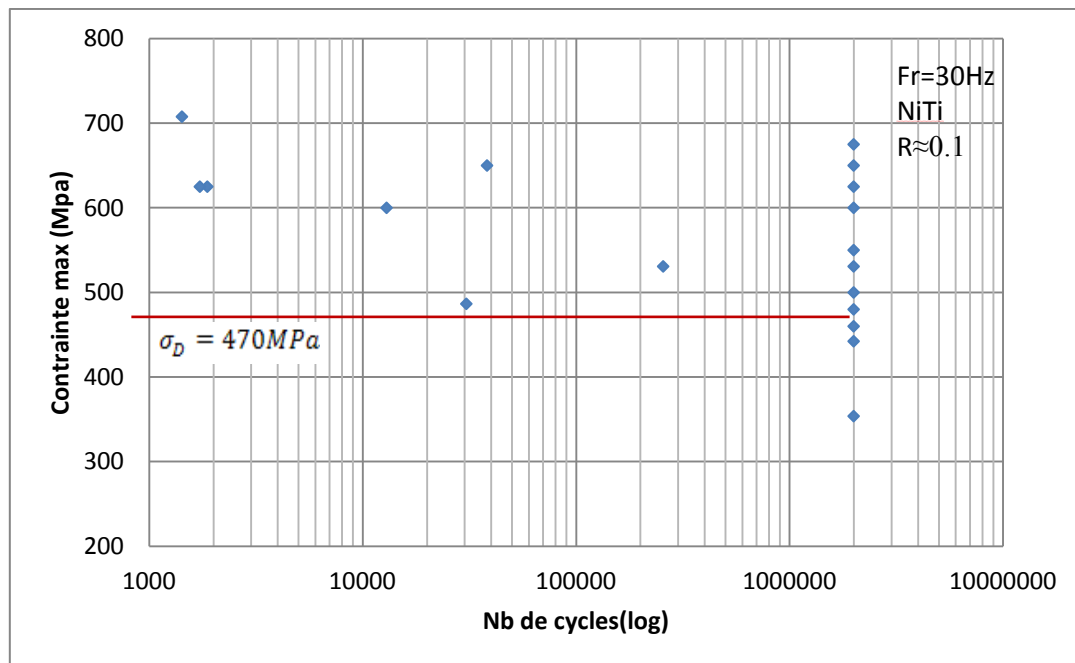


FIG. 4 - Courbe S-N de fatigue à 30Hz

Ces essais nous permettent d'obtenir la limite d'endurance, que l'on estime à 470 MPa. Ce résultat est similaire à celui obtenu avec la méthode rapide de l'auto-échauffement. Ce résultat vient donc valider la méthode de l'auto-échauffement sous sollicitation cyclique. La technique étant validée nous allons pouvoir étudier différents paramètres pouvant jouer sur les propriétés en fatigue de nos instruments dentaires.

3 Conclusion

Une campagne d'essai en fatigue a été menée sur des éprouvettes de NiTi et a permis de déterminer la limite d'endurance de ces éprouvettes. En parallèle, un essai rapide a été mis en place pour déterminer la limite d'endurance à partir d'une éprouvette et de seulement une heure d'essai. Les résultats de fatigue classique viennent valider cette méthode rapide. Cette technique va permettre d'étudier l'influence d'un grand nombre de paramètres sur la tenue en fatigue sans pour autant avoir à réaliser de longues campagnes d'essais pour étudier l'effet de plusieurs paramètres. Nous allons notamment pouvoir étudier les propriétés en fatigue de différents fils (diamètre et matériau), ou encore étudier l'impact du procédé de fabrication sur la fatigue afin de choisir le bon protocole.

Références

- [1]Patoor E, Berveiller M., Technologie des alliages à mémoire de forme, HERMES, 1994.
- [2]Saint-Sulpice L., Arbab Chirani S., Calloch S., “A 3D super-elastic model for shapememory alloys taking into account progressive strain under cyclic loadings”. *Mechanics of Materials*, 41(1):12-26, 2009.
- [3]Zaki W., Moumni Z., “A three-dimensional model of the thermomechanical behavior of shape memory alloys”. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 55, 11, 2007.
- [4]Auricchio F., Reali A., Stefanlli U., “A three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformation with permanent inelasticity”. *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, 2, 2007.
- [5] Munier R., Doudard C., Calloch S., Weber B. “Towards a faster determination of high cycle fatigue properties taking into account the influence of a plastic pre-strain from selfheating measurements”. *Procedia Engineering* 2, 1741–1750, 2010.
- [6]Doudard C., Calloch S., Hild F., Cugy P., Galtier A., "A Probabilistic Two-Scale Model for Hygh Cycle Fatigue Life Predictions". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, 3, pp. 279-289, 2005.
- [7]Calloch S., Doudard C., Hild F., Poncelet M., Weber B., Galtier A., “Dialogue essais-modèle pour l’interprétation des liens entre mesure d’auto-échauffement sous chargement cyclique et fatigue polycyclique”. *Revue de Métallurgie*, Vol. 107, pp.75-82, 2010.