Étude comparative des caractéristiques mécaniques de boulons en acier 42CrMo4 de classe 8.8 selon le processus de fabrication

YOUSSEF FARES, MICHEL CHAUSSUMIER^a ET ALAIN DAIDIÉ

Université de Toulouse, INSA, UPS, LGMT (Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse), 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse, France

Reçu le 16 janvier 2007, accepté le 8 avril 2008

Résumé – Dans cet article, nous allons présenter les résultats d’une étude comparative des caractéristiques mécaniques de boulons en acier 42CrMo4 de fabrication standard et spéciale. Cette étude porte principalement sur l’influence de la chronologie des phases de fabrication des vis sur les caractéristiques mécaniques statiques et en fatigue. Cette chronologie concerne le traitement thermique et le roulage à froid. Si aucune influence n’est visible sur la tenue statique des boulons, l’influence sur la tenue en fatigue est très importante. Par ailleurs, indépendamment du type de fabrication, nous avons remarqué que les zones de rupture sont différentes selon que l’on procède à un essai statique ou à un essai de fatigue. Dans le premier cas, la rupture a lieu dans la longueur filetée libre de prise avec l’écrou tandis qu’en fatigue, la rupture a lieu au niveau du premier filet en prise avec l’écrou. Ces différences de comportement observées expérimentalement sont corroborées par des simulations par la méthode des éléments-finis que nous avons mises en œuvre dans le cadre d’un travail sur la tenue en service des assemblages boulonnés.

Mots clés : boulons / éléments-finis / roulage à froid / caractéristiques mécaniques

Abstract – **Comparative study of the mechanical characteristics of 42CrMo4 class 8.8 steel bolts depending on the manufacture process.** In this article, we will present the results of a comparative study of the mechanical characteristics of 42CrMo4 steel bolts manufactured in standard and special method. This study principally carries on the influence on the mechanical characteristics of the chronology of thermal treatment and cold rolling that interfere in the manufacture procedure of these screws. This chronology does not seem to have influence on the static behaviour of the bolts while the influence on fatigue performances is very important. Besides, independently of the manufacture type, we were able to notice that the zones of rupture are different between static and dynamic tests. In the first case, the rupture takes place in the free thread of the bolt while in dynamic case, the rupture occurs at the level of the first thread taken with the nut. These differences on behaviours observed experimentally corroborated with the finite element models that we implemented in the framework on the held in service of the bolted assemblies.

Key words: Bolts / finite-element / cold rolling / mechanical properties

Introduction

Le dimensionnement des assemblages boulonnés sollicités en fatigue se fait usuellement en limitant la contrainte alternée autour de 50 MPa [1,2], valeur qui correspond à la limite d’endurance couramment admise pour les boulons et ce, quelle que soit la classe de boulons et les dimensions, [3,4]. Pour optimiser ce dimensionnement,

nous avons abordé le problème de la tenue en fatigue de ces boulons par une approche matériau en utilisant le critère de fatigue multiaxiale de Dang Van [5]. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux boulons roulés à froid car ce sont les plus utilisés en construction mécanique grâce à leur meilleure tenue en fatigue plutôt que les boulons dont les filets sont obtenus par usinage. Leur performance vient du fait que la matière dans les filets roulés n’est pas coupée (elle n’est que déplacée de part et d’autre du diamètre moyen et

^a Auteur pour correspondance :
michel.chaussumier@insa-toulouse.fr

Nomenclature

E	Module de Young (MPa)
R_e	Limite d'élasticité conventionnelle du matériau (MPa)
R_m	Résistance maximale à la traction (MPa)
$\hat{R}_m$	Résistance à la traction d'un boulon déterminée expérimentalement
σ^{alt}	Amplitude de la contrainte alternée nominale
σ^{moy}	Contrainte moyenne nominale
N	Nombre de cycles à rupture

déformée), contrairement aux vis usinées dont les filets sont obtenus par enlèvement de matière et ceci, quel que soit le procédé d'usinage utilisé (filetage sur tour, par filière,...). Pour les boulons roulés à froid appartenant à une même classe de qualité, nous distinguons deux catégories : les boulons de fabrication spéciale (réputés de meilleures performances) et les boulons de fabrication standard. Dans cet article, nous nous intéressons à ces deux types de boulons roulés. La différence entre ces deux types de boulons réside dans la chronologie des opérations qui suivent les premières opérations de fabrication : le forgeage à chaud de l'ébauche et son usinage ou son calibrage (les deux procédés étant possibles pour amener le lopin forgé à la bonne dimension pour l'opération de roulage). Pour les boulons de fabrication standard, le roulage à froid, qui permet l'obtention du filet, se fait avant traitement thermique. Tandis que pour les boulons de fabrication spéciale, le traitement thermique se fait avant le processus du roulage. La similitude des caractéristiques statiques et la différence importante observée sur la limite d'endurance, nous ont conduits à en analyser les causes et principalement l'ordre chronologique des opérations de roulage et de traitement thermique. Selon Ifergane et al. qui ont travaillé sur l'influence du procédé de fabrication sur les performances en fatigue de boulons à usage aéronautique [6], cette amélioration est à mettre sur le compte de l'amélioration de l'état de surface, la mise en compression de la matière, notamment en fond de filet, une augmentation du rayon à fond de filet, diminuant ainsi le coefficient de concentration de contrainte, et l'écoulement de la matière lors du roulage entraînant une orientation de la matière, au niveau de la microstructure, dans le sens des contraintes principales et perpendiculaire au trajet des éventuelles fissures, pouvant ainsi dévier les trajectoires.

1 Procédés de fabrication des vis

1.1 Les étapes de fabrication

Le procédé de fabrication de ces vis, quel qu'en soit le type, comporte trois opérations principales : le forgeage, le roulage à froid (Fig. 1) et le traitement thermique. L'opération de forgeage permet d'obtenir, à partir d'un

Fig. 1. Roulage de la vis.

Fig. 2. Lopin avant et après roulage.

lopin de diamètre donné, la tête de la vis. Ce lopin est ensuite soit usiné, soit calibré, pour l'amener au diamètre brut de roulage (Fig. 2).

Le roulage à froid du filet consiste à mettre en contact deux outils tournants diamétralement opposés, de grand diamètre, appelés « molettes », qui présentent sur leur périphérie plusieurs filets. On exerce sur ces outils un effort radial ce qui permet d'imprimer le profil des filets des molettes sur le lopin. La rotation du brut est assurée uniquement par frottement avec les molettes. Pour éviter qu'elles ne s'échappent, il est posé sur une réglette. Cette opération se fait naturellement sous un abondant flux de lubrifiant.

Le traitement thermique a pour objectif d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'acier. Pour les boulons que nous avons testés, ce traitement se fait en trois étapes : tout d'abord une austénitisation à 850 °C, suivie d'une trempe à l'huile permettant l'obtention d'une structure constituée de bainite, de martensite et d'austénite résiduelle. Pour la dimension qui nous intéresse ici (diamètre 10 mm), la trempe conduit à une microstructure homogène jusqu'au cœur de la vis. Cette trempe est suivie d'un revenu banal de façon à transformer la martensite, conduisant à une dureté de 32 HRC.

1.2 Avantages du roulage à froid par rapport aux autres procédés d'obtention des filets

Fromentin [7], dans une étude portant sur les taraudages, a montré que les filets obtenus par déformation présentaient des caractéristiques géométriques et mécaniques très différentes de celles qui sont obtenues par usinage. La figure 3 illustre ces différences : l'écoulement de la matière est discernable et on remarque

Fig. 3. Filet d'un taraudage usiné (gauche) et formé (droite) [7].

par ailleurs la formation d'une cuvette, résultant de la convergence de deux flux de matière.

Ce qui vaut pour les filets formés d'un taraudage vaut également pour les filets roulés. La formation du filet lors du procédé de roulage se fait par déformation plastique du matériau et s'accompagne d'un fort écrouissage en surface du filet formé, ce qui entraîne localement une augmentation de la limite d'élasticité $R_{P0.2}$ et de la dureté superficielle. Pour ce qui est du fond du filet, le matériau, repoussé par les molettes, se retrouve comprimé radialement tandis qu'il sert de « puits de matière » à la formation des flancs, et est donc très fortement écroui, entraînant une très forte augmentation de la limite d'élasticité dans le fond de filet qui est le lieu privilégié des amorces de rupture du fait de l'influence de la géométrie : l'effet d'entaille.

Soulignons également que le roulage permet d'obtenir un état de surface de faible rugosité comparativement à celle des surfaces de filets usinés puisqu'il n'y a pas arrachement de matière. Cette amélioration de l'état de surface est particulièrement influente à fond de filet lors des essais de fatigue : c'est l'effet d'entaille à l'échelle submicroscopique où une grande rugosité permet plus facilement l'amorçage de microfissures [8]. Outre cet effet sur la sensibilité à l'amorçage de rupture en glaçant la surface, l'obtention du filet par roulage améliore la résistance à l'oxydation et diminue les frottements mécaniques avec l'écrou.

Ces différents aspects se traduisent par une amélioration de la résistance à la fatigue pouvant atteindre jusqu'à 50 %.

2 Conditions d'essai

Cette étude porte uniquement sur des boulons en acier de nuance 42CrMo4, de classe 8.8, de diamètre M10. D'après la norme européenne NF EN ISO 898-1 [9], la limite d'élasticité $R_{P0.2}$ de ces boulons vaut 640 MPa. Les boulons testés sont issus de deux lots matières différents, que nous avons caractérisés à l'aide d'essais de traction sur des éprouvettes cylindriques usinées à partir des vis en suivant les recommandations de cette norme. Le tableau 1

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des lots matière ayant servi à la fabrication des vis standards et spéciales.

	Lot matière pour vis standard	Lot matière pour vis spéciale
E (GPa)	206	198
$R_{P0.2}$ (MPa)	810	815
R_m (MPa)	850	935
$A\%$	13	15

Fig. 4. Courbes conventionnelles de traction obtenues sur des éprouvettes prélevées dans des vis de fabrication standard et spéciale.

récapitule les caractéristiques obtenues pour ces deux lots matière.

La figure 4 montre les courbes conventionnelles correspondantes.

Les essais de traction sur les boulons ont été réalisés sur une machine de traction SCHENCK de 100 kN à commande hydraulique. Sur certains de ces boulons, nous avons collé des jauges de déformations pour déterminer le plus précisément possible le module d'élasticité. L'effort de traction a été appliqué d'un côté sous la tête de la vis et de l'autre sur la face de l'écrou situé côté tête de vis. Pour éviter les problèmes de flexion lors des essais sur boulons, ceux-ci ont été placés dans un montage articulé.

Les essais de fatigue sur les boulons ont été réalisés sur la même machine d'essai, sous des contraintes moyennes de traction nominale égales à 50 % et 80 % des limites

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques des vis de fabrication standard et spéciale.

	Vis de fabrication standard	Vis de fabrication spéciale
$R_{p0.2}$ (MPa)	830–835	835–845
R_m (MPa)	900–905	1010–1020
$A\%$	9,2	7,2

Fig. 5. Courbes de traction des vis spéciale et standard.

d'élasticité conventionnelles déterminées lors des essais de traction sur éprouvettes cylindriques.

Nous présentons les résultats obtenus dans la section suivante.

3 Essais de traction monotone sur boulons

Nous avons procédé à une série d'essais de traction monotone sur des boulons de fabrication standard et spéciale. Ces essais ont fourni les résultats présentés dans le tableau 2 et sont illustrés par la figure 5.

Nous constatons, par rapport aux caractéristiques du matériau, une augmentation des caractéristiques mécaniques (limite d'élasticité et résistance à la traction), tandis que les capacités de déformation ont diminué. Cette amélioration de la résistance est bien entendue à mettre sur le compte de la géométrie : c'est l'effet d'entaille [10].

Lorsque l'effort de traction appliqué atteint le niveau correspondant à la limite d'élasticité du matériau, seul le volume de matière en fond de filet subit de la déformation plastique. Si l'on relâche l'effort, le cœur de la vis n'ayant été déformé qu'élastiquement, la vis va retrouver sa longueur initiale. Pour obtenir une déformation plastique macroscopique de la vis, il faut augmenter l'effort au-delà de ce niveau de façon à ce que la zone plastifiée s'étende vers le cœur de la vis. Il en est de même pour la résistance à la traction ; on parle d'adaptation statique. On peut alors définir le coefficient d'adaptation statique comme étant le rapport entre la résistance à la traction de la vis, notée $\hat{R}_m$, à celle de l'éprouvette. Ce coefficient est noté δ_s :

$$\delta_s = \frac{\hat{R}_m}{R_m} = \frac{1015}{935} = 1,08 \quad (1)$$

Fig. 6. Rupture en statique d'une vis. **Fig. 7.** Résultats des essais de fatigue sur boulons de fabrication standard. **Fig. 8.** Résultats des essais de fatigue sur boulons de fabrication spéciale.

Par ailleurs, nous avons constaté à chaque fois que la rupture avait lieu dans la longueur filetée libre de prise avec l'écrou (Fig. 6).

4 Essais de fatigue sur boulons

4.1 Les résultats

Les figures 7 et 8 illustrent les résultats obtenus au cours de la campagne d'essais de fatigue. Pour les boulons de fabrication standard et spéciale, les essais ont été réalisés pour des niveaux de contraintes moyennes de 50 % et 80 % des limites d'élasticité déterminées expérimentalement.

Nous constatons la faible influence du niveau de contrainte moyenne sur la tenue en fatigue pour les boulons de fabrication standard. Cela corrobore bien ce qui

est habituellement admis dans le domaine de la tenue en fatigue des boulons [11] mais nous avons trouvé une limite d'endurance de 70 MPa, valeur légèrement supérieure à celle usuellement observée. Par contre, pour les boulons de fabrication spéciale, la tenue en fatigue est bien plus élevée que les boulons de fabrication standard lorsque la précontrainte est modérée. Mais nous observons une chute notable de cette tenue en fatigue pour de fortes précontraintes.

4.2 Influence de la chronologie des opérations de roulage et de traitement thermique : explications

Ces résultats sont en accord avec ce qui a pu être constaté par Bradley et al. qui ont étudié l'influence de la chronologie des opérations roulage/traitement thermique sur la tenue en fatigue de boulon de classe 12.9 [12]. Cette amélioration de la limite d'endurance sous faible niveau de précontrainte pour les boulons de fabrication spéciale est à mettre sur le compte de la chronologie des deux dernières opérations de fabrication : d'abord le traitement thermique puis le roulage à froid.

Le roulage à froid permet d'obtenir le filet par déformation plastique de la matière en surface d'ébauche dont le diamètre a été préalablement ajusté soit par opération de calibrage à froid, soit par usinage (dans notre cas, il s'agit d'une calibration). Cette déformation plastique n'est pas identique dans la profondeur du filet : la matière de surface est plus déformée que la matière de l'intérieur de la vis et cette déformation va en décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface. Une fois le roulage terminé, le filet est le siège de très fortes hétérogénéités de déformation plastique. Ces hétérogénéités de déformation plastique sont compensées par l'apparition de déformations élastiques de sorte que les déformations totales soient homogènes dans l'ensemble des sections de la vis. Ces déformations élastiques sont associées à des contraintes résiduelles dont on connaît bien l'influence sur la tenue en fatigue des pièces mécaniques [13–16].

Dans le cas de la fabrication standard, la vis formée subit ensuite une phase de chauffage à haute température : l'austénitisation (850 °C) durant laquelle les contraintes résiduelles de roulage se relaxent totalement [17]. Lors de la trempe à l'huile, les transformations métallurgiques se produisent simultanément entre le cœur et la surface de la vis : les déformations plastiques de transformations induites [18] sont alors identiques dans toute la section de la vis, limitant ainsi l'apparition de contraintes résiduelles supplémentaires. Lors du revenu, nécessaire à la transformation de la martensite obtenue lors de la trempe (environ 40 % pour une trempe à l'huile d'un cylindre de 10 mm de diamètre en 42 CrMo4, le reste étant principalement bainitique avec présence d'austénite résiduelle), les contraintes internes qui auraient pu subsister après la trempe seront en grandes parties relaxées. Nous pouvons donc considérer que dans ce type de fabrication standard,

Fig. 9. Rupture en fatigue d'une vis.

les boulons ne présentent quasiment aucune contrainte interne. Des essais de fatigue sur des boulons de diamètre 20 mm et de classe 8.8, dont les filets ont été soit usinés, soit roulés, mais ayant ensuite subi le traitement thermique ont d'ailleurs montré que les performances étaient peu différentes [19], ce qui tend bien à valider cette hypothèse de totale relaxation.

Dans le cas de la fabrication spéciale, l'opération de roulage venant en dernier, après le traitement thermique, les contraintes internes générées par le procédé ne seront pas ou peu relaxées. En particulier, on doit retrouver dans le fond de filet, lieu privilégié de l'amorçage des fissures de fatigue du fait de la concentration de contrainte, des contraintes résiduelles de compression : elles sont à l'origine de l'amélioration de la tenue en service.

Faisons enfin remarquer que les ruptures se sont systématiquement amorcées au fond du premier pas en prise avec l'écrou (Fig. 9).

5 Zone de rupture de la vis

Comme nous l'avons évoqué, la rupture de la vis a lieu dans des zones différentes selon que l'on sollicite le boulon statiquement ou en fatigue. Dans le premier cas, la rupture s'amorce systématiquement en fond de filet dans la longueur filetée libre de toute prise avec l'écrou, tandis que dans le cas de la sollicitation en fatigue, cette rupture s'amorce systématiquement dans le fond du premier filet en prise. Cette différence fondamentale est à mettre sur le compte des rigidités locales, la prise avec l'écrou présentant la plus grande raideur : les flancs de filet de l'écrou jouent le rôle d'obstacle à la déformation ce qui modifie l'évolution du champ de contrainte, particulièrement sous chargement cyclique.

Pour mieux cerner ce phénomène de rupture, nous avons élaboré un modèle éléments-finis (EF) axisymétrique (Fig. 10) du boulon pour simuler les deux types d'essais. Nous présentons ici les résultats obtenus lors des simulations numériques du comportement d'un boulon de fabrication standard, pour lequel la définition de la loi de comportement matériau peut être considérée comme uniforme et est donc plus simple à intégrer dans le modèle : les caractéristiques mécaniques et la loi d'écrouissage utilisée sont issues des essais de traction sur les éprouvettes de traction usinées dans les vis standards (Fig. 4 et Tab. 2). Le maillage du modèle a été développé avec le logiciel IDEAS NX11 [20] et le calcul a été réalisé avec Abaqus V.6.5.4 [21]. Le maillage ne comprend que

Fig. 10. Vues d'ensemble et de détail du modèle EF du boulon.

des éléments linéaires à 4 nœuds. À l'interface des filets, entre la vis et l'écrou, on a interposé un contact avec un frottement de 0,15. Ce contact est localisé à partir de groupes de nœuds appartenant respectivement à la vis et à l'écrou. La méthode de gestion du contact conditionne le maillage dans cette zone et elle nécessite un maillage plus raffiné sur la vis (corps maître) que sur l'écrou corps (esclave). Un nombre d'éléments important est nécessaire, afin d'être représentatif du comportement local de l'assemblage. Plusieurs finesses de maillage, surtout au niveau du fond de filet de la vis et du contact entre la vis et l'écrou, ont été mises en œuvre et analysées par simulations, afin de rechercher le meilleur compromis entre la qualité des résultats et le temps de calcul : nous avons alors 36 éléments le long du fond de filet. Le coefficient de frottement (modèle de Coulomb) a été choisi arbitrairement à 0,1. Ce choix s'est fait en accord avec l'expérience de l'équipe de recherche. La figure 10 montre le détail du maillage au niveau des filets vis et de l'écrou en contact.

Enfin, les conditions limites sont les suivantes : le chargement est appliqué sur l'extrémité supérieure de l'écrou et les déplacements axiaux de la face supérieure de la tige sont bloqués.

5.1 Résultats de la simulation de l'essai de traction monotone

Nous avons simulé l'essai de traction monotone en augmentant progressivement l'effort appliqué sur la tige filetée. Au cours de cette simulation, nous nous sommes intéressés à l'état de contrainte en fond du filet dans la longueur libre de la vis et dans le fond du 1^{er} pas en prise avec l'écrou.

L'effort appliqué sur la vis augmentant, l'état de contrainte augmente plus rapidement dans le fond du premier pas en prise qu'au fond du filet le long de la longueur libre : la plastification apparaît tout d'abord au fond du premier pas en prise, comme le montre la figure 11, représentant la contrainte équivalente de Von Mises dans les 36 éléments que l'on a en bordure du fond de filet, pour les deux zones observées. À partir de cet instant, l'intensité des contraintes en fond du filet libre de prise augmente plus rapidement qu'au fond du pas en prise,

Fig. 11. Contrainte de Von Mises dans le fond de filet pour une contrainte nominale extérieure appliquée de 310 MPa.

Fig. 12. Contrainte de Von Mises dans le fond de filet pour une contrainte nominale extérieure appliquée de 1000 MPa.

jusqu'à ce qu'il y ait plastification du fond de filet libre. Puis, l'effort extérieur continuant à augmenter, les zones plastiques s'étendent, mais c'est finalement dans le fond de filet libre que l'intensité des contraintes devient la plus forte (contrainte équivalente de Von Mises la plus élevée), comme le montre la figure 12, et que l'étendue de la zone plastique est la plus grande. Ceci explique que l'on observe l'amorce de la rupture au niveau de la longueur filetée libre de prise.

Ce changement dans le rythme de plastification à fond de filet provient du fait que le filet de l'écrou joue le rôle d'obstacle à la déformation de la vis alors que dans la longueur filetée libre de toute prise, il n'y a aucun obstacle à l'ouverture du filet.

5.2 Résultats de la simulation de l'essai de traction cyclique

Nous avons également simulé l'un des essais de traction cyclique. Rappelons que dans ce cas, la plupart des ruptures sont apparues dans le premier pas en prise avec l'écrou (95 % des cas). Même s'il y a plasticité dans tous les fonds de filet, l'explication de cette rupture est à rechercher au niveau du comportement du couple vis-écrou. En effet, le premier pas en prise avec l'écrou voit l'évolution de sa zone de contact avec la sollicitation. D'autre part, le filet de l'écrou, bien qu'il se déforme sous

Fig. 13. Contrainte en fond de filet pour une contrainte nominale minimale de 650 MPa (précontrainte nominale de 70 % $R_{P0.2}$ et une contrainte alternée nominale de 80 MPa).

Fig. 14. Contrainte en fond de filet pour une contrainte nominale minimale de 490 MPa (précontrainte nominale de 70 % $R_{P0.2}$ et une contrainte alternée nominale de 80 MPa).

la sollicitation, empêche le filet de la vis de se déplacer librement comme le filet dans la longueur filetée libre.

Ce phénomène augmente la rigidité locale et pénalise la tenue en fatigue au niveau du premier pas en prise avec l'écrou. Cela conduit à une variation de la contrainte à fond de filet plus importante dans le fond du premier pas en prise que dans le long de la longueur filetée libre, ce qui favorise l'amorçage de la fissure dans le fond de pas en prise.

Les figures 13 et 14 illustrent la variation de la contrainte dans les fonds du filet dans la longueur filetée libre et dans le fond du premier pas en prise au cours d'un cycle de contrainte.

6 Conclusion

Nous avons mené deux campagnes d'essais directement sur des boulons, pour deux niveaux de précontrainte correspondant aux niveaux de précontrainte effectivement mis en œuvre dans les assemblages boulonnés. Le décalage entre la courbe 50 % $R_{P0.2}$ des boulons « standards » et la courbe 50 % $R_{P0.2}$ des boulons « spéciaux » est à mettre sur le compte des contraintes résiduelles générées par le roulage à froid qui suit le traitement thermique dans le cas des boulons « spéciaux ». Lorsque le roulage précède le traitement thermique, comme dans le

cas des boulons « standards », la mise à température d'austénitisation (850 °C) préalable à la trempe à l'huile permet à elle seule la relaxation des contraintes résiduelles induites lors du roulage et celles induites par la trempe restent de faible niveau étant donné les conditions de la trempe. Nous avons pu remarquer que si le gain de tenue en fatigue était conséquent pour des niveaux de précontrainte relativement faible (50 % $R_{P0.2}$), ce gain diminuait considérablement lorsque cette précontrainte augmentait (80 % $R_{P0.2}$). Ceci s'explique par le fait que lorsque ces boulons sont précontraints au montage, une nouvelle plastification du fond de filet apparaît, conduisant à une relaxation d'autant plus importante des contraintes résiduelles que le niveau de précontrainte est élevé. Ce phénomène a déjà été observé sur les pièces grenillées soumises à des chargements de fatigue. Il est donc naturel de constater que le gain en fatigue dépend du niveau de précontrainte, allant en diminuant lorsque ce dernier augmente.

Références

- [1] E25-030, Norme Européenne, Éléments de fixation – Assemblages vissés – Conception, calcul et conditions de montage (2^e tirage), Publications AFNOR, ISSN 0335-3931, 1988
- [2] VDI 2230 Blatt 1, Systematische Berechnung Hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen, VDI Richtlinien, ICS 21.060.10, VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Fachbereich Konstruktion, Ausschuss Schraubenverbindungen, 2003, pp. 1–169
- [3] C. Sayettat, J.P. Faurie, M. Peyret, Assemblages boulonnés : conception et montage, Éd. CETIM, 1980, pp. 1–92
- [4] R.L. Burguette, E.A. Patterson, The effect of mean stress on the fatigue limit of high tensile bolts, J. Mech. Eng. Sci. 209 (1995) 257–262
- [5] Y. Fares, M. Chaussumier, A. Daidié, J. Guillot, Determining the life cycle of bolts using a local approach and the Dang Van criterion, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and structures 29 (2006) 1–9
- [6] S. Ifergane, N. Eliaz, N. Stern, E. Kogan, G. Shemesh, H. Sheinkopf, D. Eliezer, The effect of manufacturing processes on the fatigue lifetime of aeronautical bolts, Engineering Failure Analysis (2001) 227–235
- [7] G. Fromentin, Thèse ENSAM spécialité procédés de fabrication, Étude mécanique et technologique du taraudage par déformation : Application aux aciers prétraités, ENSAM, Cluny, N° d'ordre 2004–18, 2004
- [8] I. Itoga, K. Tokaji, M. Nakajima, H.N. Ko, Effect of surface roughness on step-wise S-N characteristics in high strength steel, Int. J. Fatigue 25 (2003) 379–385
- [9] NF EN ISO 898-1, Norme européenne, Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier au carbone et en acier allié, 1999
- [10] A. Brand, R. Sutterlin, Calcul des pièces à la fatigue – Méthode du gradient, Éd. CETIM, ISBN 2-85400-022-6, 1980, pp. 1–157

- [11] J. Guillot, Assemblage par éléments filetés : modélisation et calculs, Tome 1 B5560 à B5562, 75006, Éd. Techniques de l'ingénieur, Paris, 1987, pp. 1–56
- [12] N.J. Bradley, R.I. Stephens, N.J. Horn, J.J. Gradman, J.M. Arkema, C.S. Borgwardt, Influence of cold rolling threads before or after heat treatment on the fatigue resistance of high strength fine thread bolts for multiple preload conditions, *J. ASTM Int.* 3 (2006) 1–15
- [13] H.P. Lieurade, Effet des contraintes résiduelles sur le comportement en fatigue des pièces et des structures industrielles, *Revue de Traitement Thermique* 288 (1988) 15–27
- [14] M. Benedetti, V. Fontanari, B.R. Höhn, P. Oster, T. Tobie, Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears, *Int. Fatigue* 24 (2002) 1127–1136
- [15] A. Shaw, C. Aylott, P. O'Hara, K. Brimble, The role of residual stress on the fatigue strength of high performance gearing, *Int. J. Fatigue* 25 (2003) 1279–1283
- [16] H. Guechichi, L. Castex, Fatigue limits prediction of surface treated materials, *J. Mat. Proc. Tech.* 172 (2006) 381–387
- [17] J. Barralis, L. Castex, G. Maeder, Précontraintes et traitements superficiels, *Techniques de l'ingénieur MD1* (1999) 1–50
- [18] S. Denis, Prévision des contraintes résiduelles induites par traitements thermiques et thermochimiques, *La revue de Métallurgies Cit Science et Génie des Matériaux*, (1997) 157–176
- [19] Offshore Technology Report, OTO 97 067, Health and safety Executive, January 1998
- [20] UGS PLM Solutions Inc., I-DEAS Simulation Product Software, Release 11, 5400 Legacy Drive, Plano, Texas 75024, <http://www.ugs.com>
- [21] ABAQUS version 6.5.4, ABAQUS, Inc., Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence, RI 02909-2499 USA, <http://www.abaqus.com>